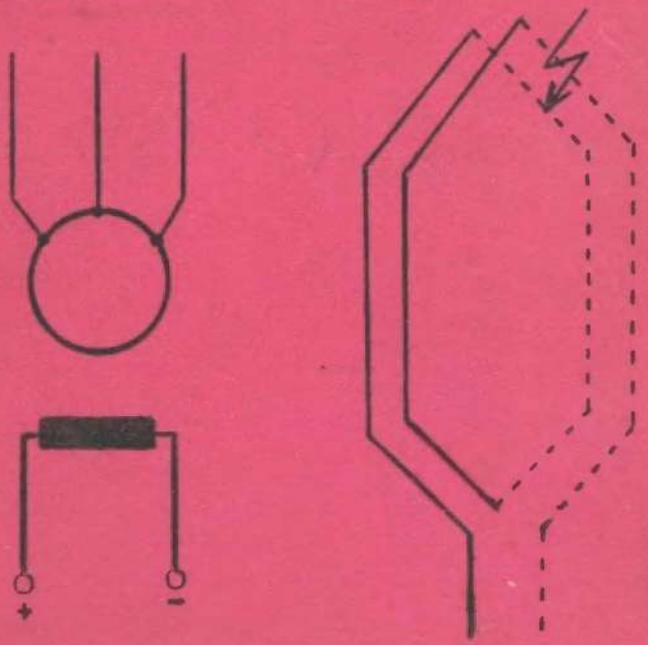
14859

ION CIOC
NICOLAE CRISTEA
NĂSTASE BICHIR

MAȘINI ELECTRICE

Îndrumar de proiectare

VOL. III



SCRISUL ROMÂNESC

Dr. ing. ION. CIOC • ing. NICOLAE CRISTEA • dr. ing. NĂSTASE BICHIR

MAŞINI ELECTRICE
Îndrumar de proiectare

Referent științific : Prof. dr. doc. ing. **ANDREI NICOLAIDE**
Coordonarea lucrării : Dr. ing. **ION CIOC**

Coperta : EUSTAȚIU GREGORIAN

Dr. ing. **ION CIOC** • ing. **NICOLAE CRISTEA**
Dr. ing. **NĂSTASE BICHIR**

MAȘINI ELECTRICE

Îndrumar de proiectare

VOL. III

I.P.I.L.
BIBLIOTECA
Inventar Nr 14859

SCRISUL ROMÂNESC, CRAIOVA, 1985

Redactor : VASILE PREDESCU
Tehnoredactor : MARILENA LUNGULESCU

Bun de tipar : 7.X.1985
Coli de tipar : 25,75+o planșă
CRAIOVA, 1985

Întreprinderea poligrafică „Oltenia"
zStr. Mihai Viteazul nr. 4, Craiova
Comanda nr. 129

Cuprinsul

PREFAȚĂ 9

PARTEA ÎNTÎI. **PROIECTAREA MAȘINII SINCRONE** 11

Capitolul 1. CALCULUL ELECTROMAGNETIC AL MAȘINII SINCRONE 15

1.1. Calculul principalelor mărimi 15
1.1.1. Curentul nominal pe fază I_N 15
1.1.2. Tensiunea electromotoare (t.e.m.) rezultantă de fază E_i 16
1.1.3. Puterea aparentă interioară S_i 18
1.1.4. Numărul de perechi de poli ai mașinii sinerone 18
1.1.5. Factorul de înfășurare k_w, de formă a t.e.m. k_b și coeficientul de acoperire ideală a pasului polar α_i 18
1.2. Calculul dimensiunilor principale 20
1.2.1. Calculul diametrelor statorului 22
1.2.2. Calculul lungimilor mașinii sinerone 27
1.3. Solicitările electromagnetice ale mașinii sinerone 31
1.3.1. Solicitările electrice 32
1.3.2. Solicitările magnetice 32
1.4. Înfășurarea și crestăturile statorului (indusului) 34
1.4.1. Numărul de crestături ale statorului 37
1.4.2. Elementele înfășurării statorului (indusului) 42
1.4.3. Tipul înfășurării și dimensiunile crestăturii 45
1.5. Calculul lățimii întrefierului 51
1.6. Dimensionarea circuitului magnetic al mașinilor sinerone . . . 53
1.6.1. Dimensionarea statorului și întrefierului 53
1.6.2. Dimensionarea rotorului 53
1.7. Înfășurarea de amortizare 65
1.8. Parametrii înfășurării indusului (în regim staționar) 68
1.9. Caracteristicile magnetice și solenația de excitație la sarcină nominală 81
1.9.1. Tensiunile magnetice (t.m.) în diferitele porțiuni ale circuitului magnetic 82
1.9.2. Construcția caracteristicilor magnetice și determinarea solenației de excitație nominală 101
1.10. Calculul înfășurării de excitație 116
1.11. Parametrii înfășurărilor rotorului (inductorului) în regim staționar 129
1.11.1. Parametrii înfășurării de excitație 129
1.11.2. Parametrii înfășurării de amortizare 132

1.12. Parametrii și constantele de timp ale regimului tranzitoriu al mașinii sincrone 139
1.12.1. Parametrii în regim tranzitoriu 139
1.12.2. Constantele de timp ale regimului tranzitoriu 140
1.13. Curenții de scurtcircuit 142
1.13.1. Curenții de scurtcircuit trifazat simetric 142
1.13.2. Curenții de scurtcircuit bifazat 143
1.13.3. Curenții de scurtcircuit monofazat 143
1.13.4. Curentul maxim de scurtcircuit brusc (șoc) 144
1.13.5. Raportul de scurtcircuit 144
1.14. Caracteristicile mașinii sincrone 146
1.15. Calculul caracteristicilor de pornire în asincron ale motoarelor sincrone 158
1.16. Influența saturației magnetice asupra parametrilor mașinii sincrone 173
1.16.1. Influența saturației magnetice asupra reactanțelor utile 174
1.16.2. Influența saturației magnetice asupra reactanțelor de scăpări 177

Capitolul 2. EXEMPLU DE CALCUL ELECTROMAGNETIC 181

Cazul 1. Generator și motor sincron trifazat cu poli aparenți 182
2.1. Calculul principalelor mărimi 182
2.2. Calculul dimensiunilor principale 184
2.3. Înfășurarea și crestăturile statorului 186
2.4. Calculul lățimii întrefierului 195
2.5. Dimensionarea circuitului magnetic 195
2.5.1. Dimensiunile piesei polare 195
2.5.2. Dimensiunile polului 196
2.5.3. Dimensiunile jugului rotorului 197
2.6. Dimensionarea înfășurării de amortizare 197
2.7. Parametrii înfășurării indusului 199
2.8. Caracteristicile magnetice și solenația de excitație la sarcină nominală 205
2.8.1. Tensiunile magnetice și tensiunea magnetomotoare la t.e.m. nominală 205
2.8.2. Construcția caracteristicilor magnetice și determinarea solenației de excitație nominală 210
2.9. Calculul înfășurării de excitație 218
2.10. Parametrii înfășurărilor rotorului în regim staționar 221
2.10.1. Parametrii înfășurării de excitație 221
2.10.2. Parametrii înfășurării de amortizare 223
2.11. Parametrii și constantele de timp ale regimului tranzitoriu . . 226
2.11.1. Parametrii în regim tranzitoriu 226
2.11.2. Constantele de timp ale regimului tranzitoriu 227
2.12. Curenții de scurtcircuit 228
2.12.1. Curenții de scurtcircuit trifazat simetric 228
2.12.2. Curenții de scurtcircuit bifazat 229
2.12.3. Curenții de scurtcircuit monofazat 230

2.12.4. Curentul maxim de scurtcircuit brusc (șoc) 231
2.12.5. Raportul de scurtcircuit 231
2.13. Caracteristicile mașinii sincrone 233
2.14. Calculul caracteristicilor de pornire în asincron ale motorului sincron 240

Cazul 2. Generator și motor sincron trifazat cu rotorul în variantă combinată 251
2.15. Dimensionarea statorului 252
2.16. Dimensionarea rotorului 257
2.17. Calculul înfășurării de amortizare 261
2.18. Parametrii înfășurării indusului 264
2.19. Caracteristicile magnetice și solenația de excitație la sarcină nominală 268
2.19.1. Tensiunile magnetice și tensiunea magnetomotoare la t.e.m. nominală 268
2.19.2. Construcția caracteristicilor magnetice și determinarea solenației de excitație nominală 275
2.20. Calculul înfășurării de excitație 282

Cazul 3. Generator și motor sincron trifazat cu poli înecați 287
2.21. Calculul lățimii întrefierului 287
2.22. Dimensionarea statorului 288
2.23. Dimensionarea rotorului 290
2.24. Calculul înfășurării de amortizare 294
2.25. Parametrii înfășurării indusului (statorului) 297
2.26. Caracteristicile magnetice și solenația de excitație la sarcină nominală 299
2.26.1. Tensiunile magnetice și tensiunea magnetomotoare la t.e.m. nominală 299
2.26.2. Construcția caracteristicilor magnetice și determinarea solenației de excitație nominală 308
2.27. Calculul înfășurării de excitație 314
2.28. Caracteristicile externă și de reglaj ale generatorului sincron cu poli înecați 318

PARTEA A DOUA. **PROBLEME SPECIFICE PRIVIND RECALCULAREA ȘI COMPORTAREA MAȘINILOR ELECTRICE** 325

Capitolul 3. PROBLEME SPECIFICE DE REPROIECTARE ȘI DE CALCUL ALE MAȘINILOR ELECTRICE 327
3.1. Probleme de mașini de curent continuu 327
3.1.1. Schimbări ale tipului de excitație 327
3.1.2. Recalculări ale mașinilor de curent continuu 339
3.2. Probleme de mașini asincrone 345
3.2.1. Calculul unui motor asincron ale cărui date principale se cunosc (se cunoaște eticheta), dar lipsește complet înfășurarea statorului 346
3.2.2. Calculul unui motor asincron cînd se cere schimbarea tensiunii înfășurării statorice 353
3.2.3. Calculul unui motor asincron în cazul cînd se cere schimbarea turației 354

3.2.4. Indicații privind recalcularea unui motor asincron căruia nu i se cunoaște nici o caracteristică inițială (lipsește și înfășurarea statorului și eticheta) 359
3.3. Probleme de transformatoare 361
3.3.1. Calculul autotransformatorului 362
3.3.2. Indicații privind calculul transformatorului cu trei înfășurări 378
3.4. Probleme de mașini sincrone 380
3.4.1. Determinarea căderii de tensiune la bornele generatorului sincron, la cuplarea bruscă a unei suprasarcini de curent 381
ANEXE 389
BIBLIOGRAFIE 412

Prefață

Proiectarea mașinii sincrone și unele probleme specifice de calcul și reproiectări constituie ultimul volum (volumul III) al Îndrumarului de proiectare *a mașinilor electrice normale.*

În prima parte a lucrării — mașina sincronă — sînt cuprinse principalele aspecte de proiectare, atît în regim de generator, cît și în cel de motor, cu rotorul în cele trei variante constructive de bază: poli aparenți, poli înecați și varianta combinată.

În cazul mașinii sincrone cu poli aparenți, de obicei cea mai cunoscută, se prezintă pe lîngă elementele tratate în mod obișnuit și unele aspecte mai noi, în special în domeniul parametrilor, lucru esențial avînd în vedere faptul că mașina sincronă este folosită în scheme de acționări din ce în ce mai complexe, și deci se impune cunoașterea performanțelor sale în mod cît mai riguros.

În cazul mașinii sincrone cu poli înecați sînt cuprinse, cît mai explicit posibil, calculele, atît în regim de generator, cît și de motor. Trebuie menționat faptul că în acest domeniu literatura de specialitate este mai redusă, în mai toate situațiile tratîndu-se, de regulă, cazul turbogeneratoarelor cu $2p = 2$, neglijînd generatoarele cu $2p > 2$ și, în special, motoarele sincrone cu poli înecați. Acest lucru era cu atît mai dezavantajos cu cît în momentul de față se execută chiar serii unitare de mașini sincrone — generatoare + motoare — în această construcție.

În cazul noului tip de mașină sincronă cu rotorul în variantă combinată, sînt prezentate aspectele specifice de calcul al acestor mașini, precum și diferențierea de celelalte două tipuri constructive obișnuite.

Lucrarea menționează, pentru prima dată în literatura de specialitate, faptul că, în cazul funcționării mașinilor sincrone cu regimuri tranzitorii frecvente (șocuri, porniri în asincron dese etc.), este indicat să se folosească pentru înfășurarea de amortizare numai inele de scurtcircuitare complete; *altfel, în cazul utilizării* inelelor de

scurtcircuitare incomplete (*segmente de scurtcircuitare numai pe porțiunea piesei polare, fără a se uni între ele*), *curenții din înfășurarea de amortizare după axa transversală care se închid, de la pol la pol, prin masa fierului rotoric, vor solicita foarte mult la încălzire* (*pînă la înroșire*) *elementele de fixare a polilor sau pieselor polare* (*șuruburile de prindere*). *Aceste solicitări termice mari, combinate cu solicitările mecanice, pot conduce, fapt constatat în exploatare, la ruperea șuruburilor, deși din punct de vedere mecanic acestea au fost dimensionate corespunzător.*

Un ajutor deosebit în această parte a lucrării a fost dat de prof. dr. doc. ing. A. Nicolaide, prin stabilirea relațiilor corecte de calcul al parametrilor mașinilor, în toate variantele constructive, căruia îi aducem și pe această cale deosebite mulțumiri.

În a doua parte a lucrării sînt cuprinse aspecte mai puțin tratate în literatura de specialitate. Astfel, se prezintă probleme de „proiectare inversă" și de recalculări ale unor mașini, căderile de tensiune în procesele tranzitorii ale cuplării în mod brusc a unei sarcini la bornele generatorului sincron etc.

În ansamblu, lucrarea are în vedere, ca și volumele anterioare, standardele și normele existente în momentul actual, și caută să-i îndrume pe specialiști în proiectarea unor mașini cît mai economice, atît din punct de vedere constructiv, cît și funcțional.

Faptul că fiecare expunere este însoțită de exemple concrete de calcul, face ca lucrarea să fie clară, eliminîndu-se eventualele confuzii.

Modul cum este tratat prezentul volum, cu expuneri și explicații teoretice și exemplificări concrete, îl face util unui cerc foarte larg de specialiști cu pregătiri de diverse nivele.

Mulțumim tuturor celor care au contribuit și vor contribui, prin sugestii și propuneri, la reușita lucrării.

AUTORII

Partea întîi

PROIECTAREA MAȘINII SINCRONE

Sînt cunoscute calitățile deosebite ale mașinilor sincrone, atît ca generator, cît și ca motor.

Ca generator, mașina sincronă se folosește, practic în exclusivitate, în procesul de producere a curentului electric alternativ.

Ca motor, mașina sincronă prezintă o importanță cu totul aparte, atît prin funcționarea sa la turație constantă, cît mai ales datorită posibilității de a acționa asupra cuplului motor prin trei elemente : tensiune, frecvență și excitație. Aceasta face ca folosirea motorului sincron să cuprindă domenii din ce în ce mai largi, în special odată cu apariția posibilităților de reglare a tensiunii și frecvenței prin circuite cu semiconductoare.

Din aceste motive, mașinile sincrone s-au dezvoltat și au evoluat continuu atît spre forme constructive specifice ca : turbogeneratoare, hidrogeneratoare, motoare sincrone speciale etc., cît și spre forme generale noi — cum este rotorul în varianta combinată, invenție dr. ing. Ion Cioc (vezi fig. 2.8), care îmbină avantajele funcționale ale mașinii sincrone cu poli aparenți cu avantajele economice ale mașinii sincrone cu poli înecați.

Mașinile sincrone prezintă o largă varietate constructivă.

Astfel, în funcție de forma constructivă a rotorului se disting :

— mașini cu poli aparenți (vezi fig. 1.16 a, c și d) ;

— mașini cu poli înecați (vezi fig. 1.16 b și fig. 2.11) ;

— mașini cu rotorul în variantă combinată (vezi fig. 1.18 și fig. 2.8).

În funcție de modul cum sînt amplasate cele două armături (indusul și inductorul) se disting :

— mașini în construcție *normală*, cu statorul indus și rotorul inductor (cu înfășurarea de excitație) ;

— mașini în construcție *inversă*, cu statorul inductor (similar ca la mașina de curent continuu, însă fără poli auxiliari) și rotorul indus (cu înfășurarea trifazată legată la inele colectoare).

Cea mai răspîndită formă este construcția normală cu statorul ca indus construit identic ca la mașina asincronă și rotorul ca inductor în una din cele trei forme constructive posibile (poli aparenți, înecați sau varianta combinată).

În cele ce urmează se va avea în vedere mașina sincronă trifazată în construcție normală, atît pentru regimul de generator cît și pentru cel de motor.

De asemenea, prezenta lucrare va conține numai elemente de calcul electromagnetic; celelalte calcule (pierderile și randamentul, calculul mecanic, de ventilație și termic) fiind similare cu cele de la mașina de curent continuu (volumul I) și mașina asincronă (volumul II).

Lucrarea este astfel concepută încît necesită un volum de cunoștințe corespunzător în acest domeniu, putînd fi utilizată deci de specialiști (muncitori cu înaltă calificare, tehnicieni și ingineri) și de studenții cursurilor de ingineri și subingineri (zi și seral) din domeniul electrotehnic.

Calculul și construcția mașinii sincrone ca și la celelalte mașini, se fac pornind de la anumite date care să precizeze atît performanțele tehnice cît și cele constructive și funcționale.

Așadar, tema de proiectare a unei mașini sincrone cuprinde următoarele date:

A. **Datele nominale:**

a) puterea nominală:
- pentru generator: S_N, în VA sau kVA;
- pentru motor: P_N, în W sau kW;

b) tensiunea nominală U_N, în V sau kV, care este tensiunea de linie;

c) numărul de faze m: pentru trifazat $m = 3$;

d) turația sincronă n_1, în rot/min;

e) frecvența f_1, în Hz, care:
- pentru motor este frecvența tensiunii de alimentare;
- pentru generator este frecvența tensiunii furnizate la borne;

f) factorul de putere cos φ_N, care dacă nu se impune, se alege din STAS 1893-78 și anume:
- cos $\varphi_N = 0{,}8$ (inductiv) — pentru generator;
- cos $\varphi_N = 0{,}9$ (capacitiv) — pentru motor;
- cos $\varphi_N = 0$ — pentru compensator (generator de energie reactivă).

B. **Datele funcționale și constructive:**

- gradul de protecție conform STAS 625-76;
- alte condiții specifice legate de tipul constructiv, mediu și altitudinea de funcționare, serviciul de lucru (S_1, S_2, ...).

La motorul sincron se mai impun și caracteristicile de pornire în asincron: M_p/M_N, I_p/I_N, M_i/M_N necesare la dimensionarea coliviei de pornire (M_i, este cuplul de intrare în sincronism, la alunecarea $s = 0{,}05$).

În funcție de destinația mașinii mai pot fi impuse și unele mărimi esențiale:
- raportul de scurtcircuit $RSC = 1/x_d$, unde reactanța sincronă longitudinală $x_d = 0{,}8 \div 1{,}7$ u.r.;
- viteza periferică;
- momentul de volant GD^2 etc.

O importanță deosebită pentru datele de proiectare o au, uneori, condițiile concrete în care este pusă să funcționeze mașina, cerute de destinația acesteia, care pot fi hotărîtoare în stabilirea soluției constructive. Astfel, pentru turbogeneratoare, ale căror puteri și turații sînt mari, se are în vedere, de fiecare dată, la stabilirea definitivă a soluției adoptate, rezolvarea, mai întîi, a problemelor mecanice și, apoi, încadrarea în performanțele impuse a parametrilor și caracteristicilor tehnico-economice.

În cazul hidrogeneratoarelor, caracterizate prin puteri mari, însă la turații reduse, cerute de condițiile specifice ale turbinelor folosite, problemele esențiale ce trebuiesc rezolvate, datorită dimensiunilor mari care rezultă, sînt legate, în primul rînd, de posibilitățile de transport pînă la destinație, în funcție de care se adoptă cele mai indicate soluții, atît pentru stator, cît și pentru rotor, soluții care trebuie să corespundă, evident, și din punct de vedere mecanic și al performanțelor tehnico-economice.

O categorie aparte o constituie, în ultimul timp, generatoarele sincrone destinate tracțiunii electrice. Sub aspect funcțional, care influențează datele de proiectare, aceste mașini prezintă următoarele particularități:

— sarcina lor, constituită din puntea redresoare, este puternic deformantă pentru mărimile sinusoidale. Se au în vedere deci pierderile suplimentare ce apar;

— sistemul de amortizare al acestora trebuie să fie foarte puternic, pentru ca armonicele superioare să nu pătrundă și în inductor;

— datele nominale sînt indicate, de regulă, pentru două situații posibile în funcționare : a) tensiune maximă și curent de sarcină minim corespunzătoare vitezei de croazieră a locomotivei ; b) tensiune minimă și curent de sarcină maxim corespunzătoare condițiilor grele de funcționare ale locomotivei. Se observă deci că mașina trebuie dimensionată pentru ambele situații : în prima situație predomină solicitările magnetice, iar în cea de a doua solicitările electrice.

Alte aspecte care pot influența datele de proiectare ale mașinii sînt legate de tipul și forma constructivă, condiții de mediu, altitudine, sistem de ventilație etc. În lucrare se au în vedere mașinile cu condiții normale indicate de STAS 1893-78, în construcție protejată (tip IP 23) și cu autoventilație (ventilator propriu) ; pentru alte condiții sînt prevăzute, la fiecare paragraf, observații corespunzătoare.

Capitolul 1

CALCULUL ELECTROMAGNETIC AL MAȘINII SINCRONE

Calculul electromagnetic are drept scop, în prima etapă, stabilirea dimensiunilor mașinii pe baza datelor din tema de proiectare și a solicitărilor electromagnetice recomandate, iar în a doua etapă calculul parametrilor și caracteristicilor tehnice obținute din geometria adoptată.

Dacă aceste performanțe coincid cu cele impuse prin tema de proiectare, înseamnă că dimensionarea este bine făcută urmînd să se treacă la etapele următoare de proiectare ale mașinii : calculul mecanic, de ventilație, termic și proiectarea construcției.

1.1. CALCULUL PRINCIPALELOR MĂRIMI

1.1.1. CURENTUL NOMINAL PE FAZĂ I_N

a) Pentru conexiunea fazelor în stea (Y)

$$I_{NG} = \frac{S_N}{\sqrt{3}\ U_N}\ [\mathrm{A}] \tag{1.1}$$

relație valabilă în cazul funcționării mașinii în regim de generator.

Pentru motor, ținînd cont că :

$$S_N = \frac{P_N}{\eta_N \cos \varphi_N}\ [\mathrm{VA}] \tag{1.2}$$

unde η_N este randamentul nominal al motorului care, inițial, se estimează din curba $\eta = f(P_N, n_1)$ din figura 1.1, rezultă

$$I_{NM} = \frac{P_N}{\sqrt{3}\ U_N \eta_N \cos \varphi_N}\ [\mathrm{A}] ; \tag{1.3}$$

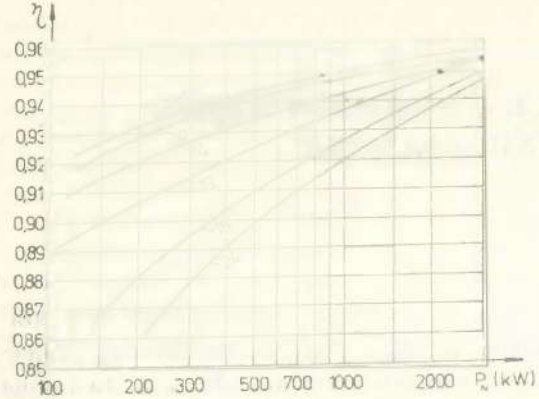


Fig. 1.1 — Randamentul η al motoarelor sincrone.

b) Pentru conexiunea fazelor în triunghi ($\triangledown$)

$$I_{NG} = \frac{S_N}{mU_N} \text{ [A]} \qquad (1.1\ a)$$

pentru generator și

$$I_{NM} = \frac{P_N}{mU_N \eta_N \cos \varphi_N} \text{ [A]} \qquad (1.2\ a)$$

pentru motor.

OBSERVAȚIE. Pentru conexiunea stea, curentul nominal pe fază este același cu cel de linie. Pentru conexiunea triunghi însă, curentul determinat cu relația (1.1 a) sau (1.2 a) este cel de fază ; curentul nominal de linie și care se scrie pe eticheta mașinii (în funcție de care se dimensionează conductoarele de alimentare) este

$$I_{Nl} = \sqrt{3}\, I_N \text{ [A]}.$$

1.1.2. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE (t.e.m.) REZULTANTĂ. DE FAZĂ E_1

T.e.m. rezultantă de fază, se deduce, ca valoare, din ecuația de funcționare a generatorului sincron

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \qquad (1.4)$$

în care impedanța, pe fază a statorului

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}.$$

Presupunînd că $R_1 \ll X_{\sigma 1}$, din reprezentarea fazorială a ecuației de tensiuni (fig. 1.2) rezultă :

$$E_1 = \overline{OB} = \overline{OA} + \overline{AB}$$

unde :

$\overline{OA} \approx U_1$ = tensiunea pe fază. Pentru tensiunea nominală, rezultă :

$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$, la conexiunea stea (Y) ;

$U_{1N} = U_N$ la conexiunea triunghi ($\triangledown$) ;

$\overline{AB} = X_{\sigma 1} I_1 \sin \varphi$.

Deci :

$$E_1 = U_1 + X_{\sigma 1} I_1 \sin \varphi. \qquad (1.4\ a)$$

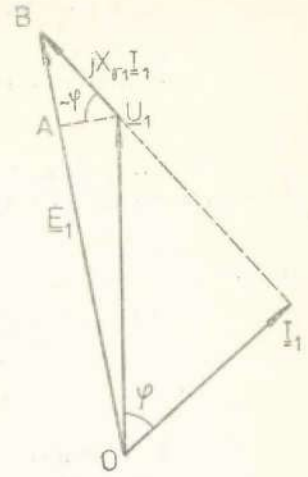


Fig. 1.2 — Reprezentarea fazorială a ecuației (1.4), pentru cazul cînd $R_1 \ll X_{\sigma 1}$.

Dacă relația (1.4 a) se împarte cu U_1 și se notează

$$k_E = \frac{E_1}{U_1},$$

rezultă :

$$k_E = \frac{E_1}{U_1} = 1 + \frac{X_{\sigma 1} I_1}{U_1} \sin \varphi = 1 + x_{\sigma 1} \sin \varphi \qquad (1.4\ b)$$

în care :

$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} I_1}{U_1}$ (u.r.) este reactanța de scăpări pe fază a statorului în unități relative (la sarcină nominală $I_1 = I_N$ și $U_1 = U_{1N}$).

T.e.m. de fază rezultă astfel, în final (valoare estimativă)

$$E_1 = k_E U_1 \text{ și } E_{1N} = k_E U_{1N} \text{ [V]}. \qquad (1.5)$$

De obicei, pentru valorile obișnuite ale lui $x_{\sigma 1}$ și $\sin \varphi_N$ (în funcție de $\cos \varphi_N$) rezultă :

$k_E = 1{,}08$ pentru generatoare ($\cos \varphi_N = 0{,}8$) ;
$k_E = 1{,}15 \div 1{,}18$ pentru compensatoare ($\cos \varphi_N = 0$) ;
$k_E = 1{,}05 \div 1{,}06$ pentru motoarele sincrone supraexcitate ($\cos \varphi_N = 0{,}9$c).

1.1.3. PUTEREA APARENTĂ INTERIOARĂ S_i

Puterea aparentă interioară este dată de relația

$$S_i = mE_1I_1 \text{ [VA]}. \tag{1.6}$$

Dacă se introduce E_1, din relația (1.5) atunci puterea aparentă interioară nominală este

$$S_{iN} = k_E S_N \text{ [VA]} \tag{1.7}$$

în care :

$$S_N = mU_{1N}I_{1N} \text{ [VA]} \text{ — pentru generator;} \tag{1.7 a}$$

$$S_N = \frac{P_N}{\eta_N \cos \varphi_N} \text{ [VA]} \text{ — pentru motor.}$$

1.1.4. NUMĂRUL DE PERECHI DE POLI AI MAȘINII SINCRONE

Numărul de perechi de poli rezultă din relația :

$$p = \frac{60f_1}{n_1} \tag{1.8}$$

unde f_1 este frecvența, în Hz, iar n_1 — turația sincronă în rot/min.

1.1.5. FACTORUL DE ÎNFĂȘURARE k_w, DE FORMĂ A t.e.m. k_B ȘI COEFICIENTUL DE ACOPERIRE IDEALĂ A PASULUI POLAR α_i

A. **Factorul de înfășurare pentru armonica fundamentală** se determină cu relațiile :

— pentru q = număr întreg

$$k_w = k_p k_y = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{y_1}{y_\tau}\right); \tag{1.9}$$

— pentru q = număr fracționar, vezi relația (1.22)

în care :

k_p este factorul de repartizare a înfășurării în crestături;

k_y — factorul de scurtare a pasului principal y_1;

q — numărul de crestături pe pol și fază.

Dacă

$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_1} = \frac{\pi}{mq}$ [°el.] — unghiul de defazaj dintre două crestături vecine, în °el., atunci rezultă

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{q\alpha}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}$$

unde :

$Z_1 = 2pmq$ — numărul de crestături;

$y_1 = Z_1/2p - \varepsilon$ = număr întreg — pasul principal al înfășurării, în crestături;

$y_\tau = mq$ — pasul diametral al înfășurării.

De obicei valoarea relativă a pasului principal

$$\beta_y = \frac{y_1}{y_\tau} \approx \frac{5}{6} \tag{1.9 a}$$

ceea ce înseamnă o scurtare normală a pasului principal de 1/6 din cel diametral pentru diminuarea atît a armonicii de ordinul 5, cît și a celei de ordinul 7, armonica de ordinul 3 fiind eliminată prin însăși particularitățile sistemului trifazat.

Relația (1.9) este valabilă atunci cînd crestăturile sînt pe generatoarele miezului magnetic. În cazul în care crestăturile sînt înclinate față de generatoare, atunci în factorul de înfășurare intervine și factorul de înclinare k_i, dat de relația

$$k_i = \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2} \frac{b}{t_1}\right)}{\frac{\alpha}{2} \frac{b}{t_1}} \tag{1.9 b}$$

în care b este înclinarea față de generatoare a crestăturilor.

Rezultă astfel că expresia generală a factorului de înfășurare este

$$k_w = k_p k_y k_i. \tag{1.9 c}$$

Valorile calculate ale factorului de înfășurare în cazul crestăturilor neînclinate se pot lua din anexa 1. Dacă mașina are cres-

tăturile înclinate, atunci valoarea rezultată din anexa 1 trebuie înmulțită cu k_i, calculat cu relația (1.9 b).

Inițial dacă nu se cunosc mărimile necesare determinării lui k_w se poate estima, pentru calculele preliminare

$$k_w = 0{,}91 \div 0{,}93. \qquad (1.9\ d)$$

B. **Factorul de forma a t.e.m. k_B și coeficientul de acoperire ideală a pasului polar α_i**

— Pentru *mașinile cu poli aparenți* α_i și k_B se iau din figura 1.3 în funcție de α_p, δ_M/δ și δ/τ care se aleg inițial în următoarele limite :

$\alpha_p = b_p/\tau = 0{,}5 \div 0{,}75$ (obișnuit $\alpha_p = 0{,}65 \div 0{,}75$) ;

$\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$;

$\delta/\tau = 0{,}01 \div 0{,}03$.

— Pentru *mașinile cu rotorul în variantă combinată* k_B se ia identic ca la mașinile cu poli aparenți similari (cu aceeași piesă polară) din figura 1.3. Coeficientul α_i este însă ceva mai mare decît α_i pentru poli aparenți similari și anume

$$\alpha_i = (1{,}06 \div 1{,}08)\alpha_{i\ \text{pol. apar.}}$$

în care $\alpha_{i\ \text{pol. apar.}}$ este valoarea lui α_i pentru mașina cu poli aparenți similari, luată din figura 1.3.

— Pentru *mașinile cu poli înecați* α_i și k_B se iau ca pentru regimul sinusoidal :

$$\alpha_i = 2/\pi \; ; \; k_B = k_f = 1{,}11.$$

1.2. CALCULUL DIMENSIUNILOR PRINCIPALE

Acest calcul are drept scop stabilirea diametrelor interior stator (D), exterior stator (D_e) și lungimea ideală (l_i), în funcție de care rezultă gabaritul mașinii. Determinarea lor se face similar ca la mașina asincronă (vezi și vol. II, paragraful 1.2).

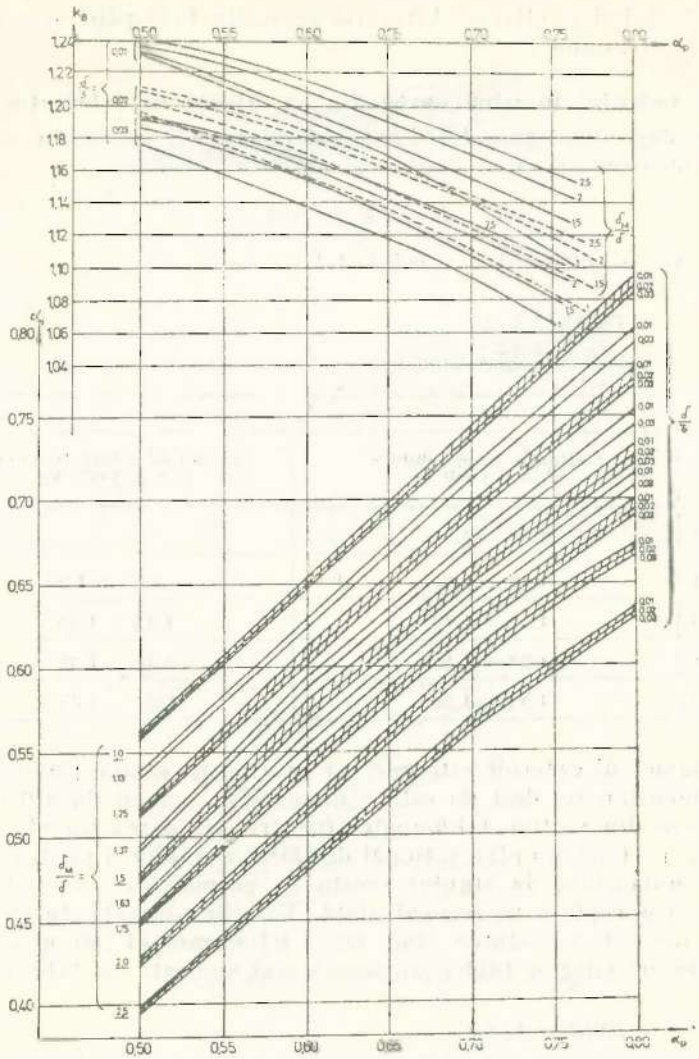


Fig. 1.3 — Factorul k_B și coeficientul α_i, pentru mașinile sincrone cu poli aparenți.

1.2.1. CALCULUL DIAMETRELOR STATORULUI

Calculul diametrelor statorului se poate face prin mai multe metode și anume :

A. Calculul folosind curbe din experiența de fabricație

Se alege din figura 1.4 diametrul interior D în funcție de S_{iN} și p calculîndu-se apoi diametrul exterior

$$D_e = k_D D \text{ [m]} \tag{1.10}$$

unde k_D se alege din tabelul 1.1.

TABELUL 1.1

Valorile coeficientului k_D

$2p$	k_D	
	mașini de joasă tensiune ($U_N < 1\,000$ V)	mașini de înaltă tensiune ($U_N > 1\,000$ V)
2	1,65 ÷ 1,69	—
4	1,46 ÷ 1,49	1,55 ÷ 1,59
6	1,37 ÷ 1,40	1,44 ÷ 1,46
8	1,27 ÷ 1,30	1,36 ÷ 1,38
⩾ 10	1,24 ÷ 1,26	1,30 ÷ 1,32

Diametrul exterior este necesar în această etapă preliminară de dimensionare, deși nu este o dimensiune principală a mașinii, deoarece din motive tehnologice (pentru obținerea unorformate care să permită un plan rațional de tăiere a tablei și pentru reducerea numărului de ștanțe) acesta se normalizează la valoarea cea mai apropiată de cea calculată. Valorile normalizate ale diametrului exterior stator cînd $D_e < 1\,100$ mm (1 100 mm este lățimea maximă a tablei silicioase) sînt indicate în tabelul 1.2.

TABELUL 1.2

Valorile normalizate ale diametrului exterior stator

D_e [mm]	210	250	280	330	380	425	495	560	595	650	740	850	930	1 100

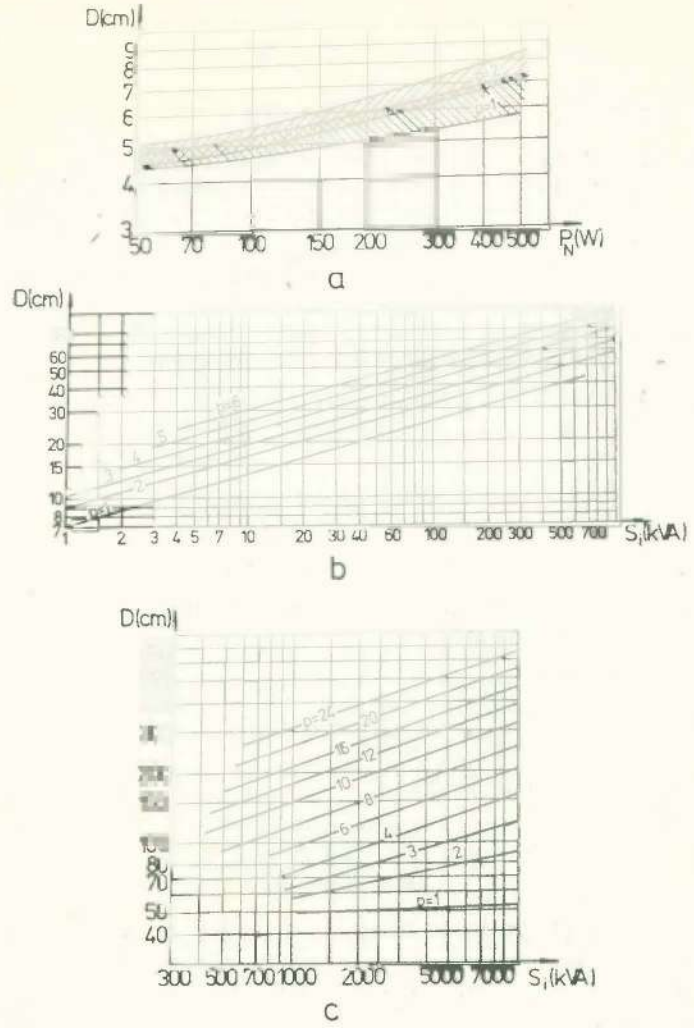


Fig. 1.4 — Diametrul interior stator D în funcție de puterea interioară S_i (sau de puterea nominală P_N) și de numărul perechilor de poli p :

a — pentru mașini mici ; b — pentru mașini mijlocii ; c — pentru mașini de puteri mari.

După normalizarea lui D_e, se recalculează, diametrul interior stator

$$D = \frac{D_{enorm}}{k_D} \text{ [m]} \qquad (1.10\ a)$$

valoare care se va folosi în calculele ulterioare.

Din motive practice, diametrul D se rotunjește fie la valoarea cea mai apropiată pentru care în întreprindere există ștanță (dacă aceasta nu diferă cu mai mult de 5 mm de diametrul determinat cu relația (1.10 a)) fie la valori din 5 în 5 mm.

În cazul cînd $D_e > 1\,100$ mm (miez din segmente) a se vedea observația de la sfîrșitul paragrafului 1.2.2.

B. **Calculul folosind coeficientul de utilizare**

O altă metodă de calcul al diametrului D (în funcție de care rezultă D_e) este aceea care folosește coeficientul de utilizare a mașinii

$$C = \frac{60 S_{iN}}{D^2 l_i n_1} = k_{CA} \pi^2 A B_\delta \text{ [J/dm}^3\text{]} \qquad (1.10\ b)$$

în care se ia: S_{iN} în VA; D, l_i în dm, iar n_1 în rot/min.

Din figura 1.5, similar ca la mașina asincronă, în funcție de S_i și de p, se ia coeficientul C.

Cunoscînd că:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \text{ și } l_i = \lambda \tau \qquad (1.10\ c)$$

rezultă din relația (1.10 b)

$$D = \sqrt[3]{\frac{60 S_{iN} 2p}{\pi C n_1 \lambda}} \text{ [dm]}. \qquad (1.11).$$

Cu relația (1.10) se calculează D_e, apoi se normalizează la valoarea cea mai apropiată din tabelul 1.2. Cu relația (1.10 a) și (1.10 c) se recalculează diametrul interior D și pasul polar τ.

C. **Calculul din alte condiții impuse de temă**

a) *Din viteza periferică a rotorului*

La mașinile de puteri mari, viteza periferică limită v_{max} reprezintă o condiție restrictivă. Viteza periferică a rotorului este limitată de solicitările mecanice admisibile ce apar în rotor.

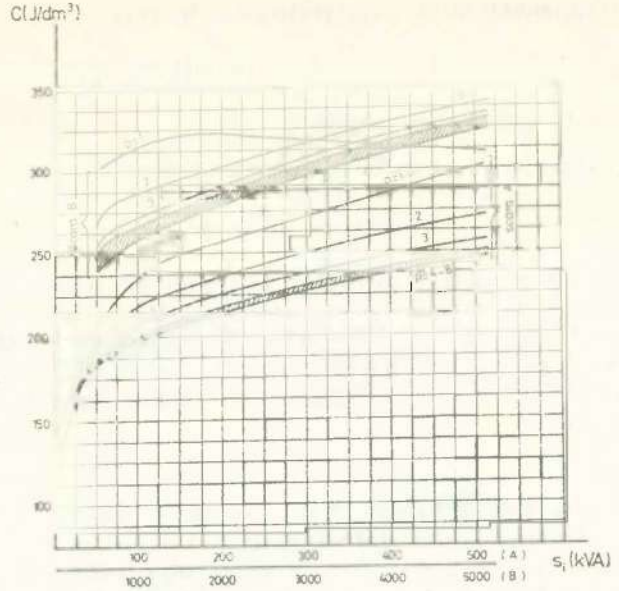


Fig. 1.5 — Valorile coeficientului de utilizare C, a mașinilor sincrone, în funcție de puterea interioară S_i și de numărul perechilor de poli p.

La turbogeneratoarele sincrone de puteri foarte mari, viteza periferică limită este sub 170 m/s, iar la hidrogeneratoare viteza periferică limită, în regim nominal este în jur de 50 m/s. În acest caz diametrul maxim al rotorului rezultă din relația

$$D_r = \frac{60 v_{max}}{\pi n_1} \text{ [m]} \qquad (1.12)$$

iar lățimea întrefierului se aproximează în funcție de puterea mașinii.

Avînd diametrul rotorului D_r și lățimea întrefierului δ se calculează diametrul interior al indusului cu relația

$$D = D_r + 2\delta \text{ [m]} \qquad (1.13)$$

în funcție de care se determină D_e ca mai sus (relația (1.10)).

b) *Din momentul de inerție al rotorului*

La mașinile sincrone cu momentul de inerție dat, diametrul rotorului se determină din momentul de inerție dacă viteza periferică nu reprezintă o condiție restrictivă.

Expresia momentului de inerție J este :

$$J = \frac{\pi D_r^2}{64} \gamma_r l_i \ [\text{kgm}^2] \qquad (1.14)$$

unde γ_r este densitatea rotorului.

Din expresia momentului de inerție, ținînd cont că

$$l_i = \lambda\tau \approx \lambda \frac{\pi D_r}{2p} \ [\text{m}]$$

se calculează diametrul rotorului D_r, apoi cu relația (1.13) rezultă D, în funcție de care se determină D_e.

Valorile lui $\lambda = l_i/\tau$ se determină din condiția ca volumul de conductor al înfășurării din indus și inductor să fie minim.

Valorile optime ale lui λ depind de numărul de perechi de poli p, după relația aproximativă

$$\lambda_{optim} \approx 0{,}5\sqrt{p}.$$

Limitele admisibile ale lui λ pentru mașinile cu poli aparenți și varianta combinată sînt date în figura 1.6, iar pentru mașinile cu poli înecați a se vedea mai jos observația a 2-a.

O valoare mare pentru λ, înseamnă diametre D mici și lungimi mari ale mașinii. Acest lucru conduce la lungimi mici ale părților frontale a înfășurării în raport cu părțile active (din crestătură) și deci o utilizare mult mai bună a volumului de conductoare. Pe de altă parte valori prea mari ale raportului λ, conduc la posibilități de răcire a înfășurării, reduse.

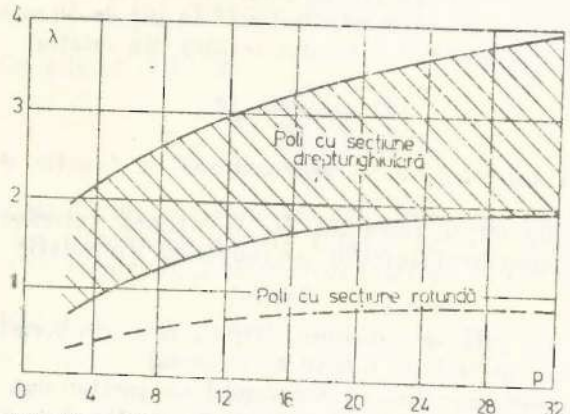


Fig. 1.6 — Valoarea optimă a raportului $\lambda = l_i/\tau$, în funcție de numărul perechilor de poli p.

1.2.2. CALCULUL LUNGIMILOR MAȘINII SINCRONE

A. Lungimea ideală

$$l_i = \frac{60 S_{iN}}{k_{CA}\pi^2 D^2 n_1 A B_\delta} \ [\text{m}] \qquad (1.15)$$

cu D în m, A în A/m, B_δ în T și n_1 în rot/min, iar

$$k_{CA} = \frac{\pi k_w}{2\sqrt{2}} \alpha_i.$$

Valorile solicitărilor electromagnetice (A și $B\delta$) în funcție de pasul polar τ și numărul de perechi de poli p, pentru mașinile normale avînd clasă de izolație B și F sînt indicate în figura 1.7.

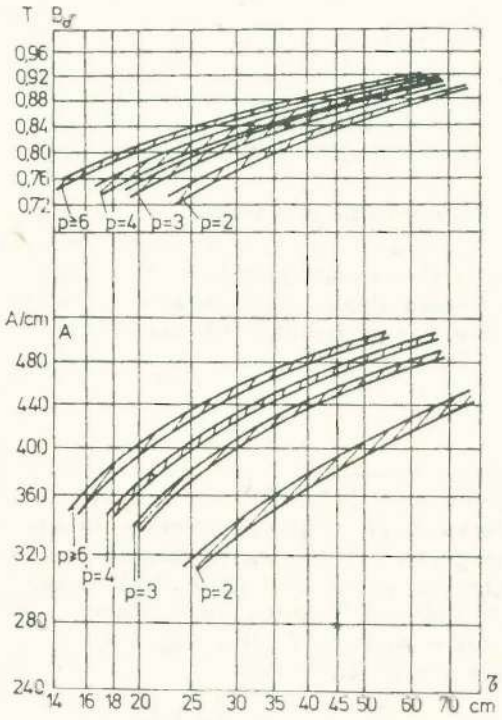


Fig. 1.7 — Inducția maximă în întrefier B_δ și pătura de curent A, în funcție de pasul polar τ și de numărul perechilor de poli p, pentru mașinile sincrone în construcție protejată.

OBSERVAȚII. 1) Pentru clasa de izolație F și mașini bine ventilate, pătura de curent a mașinilor cu poli aparenți se poate lua mai mare cu aproximativ $5 \div 7\%$ decît valorile obținute din figura 1.7.

2) Pentru mașinile cu poli înecați atît raportul λ, pătura de curent A, cît și inducția maximă în întrefier B_δ, se recomandă a se lua cu $5 \div 7\%$ mai mari decît valorile rezultate din figura 1.6 respectiv 1.7.

3) Pentru mașinile în construcție închisă B_δ se ia mai mic cu circa 10% iar A mai mic cu circa 12%, decît valorile rezultate din figura 1.7.

Cu valoarea calculată a lui l_i, se verifică raportul

$$\lambda = l_i/\tau$$

(cu l_i în cm) care trebuie să se încadreze în limitele indicate în figura 1.6, respectiv în observația a 2-a de mai sus. Dacă nu se încadrează, se ia alt D_r normalizat (superior sau inferior, în funcție de cum a rezultat λ). Unele considerații asupra valorilor lui λ sînt expuse și în paragraful 1.2.1 C (punctul b).

B. Geometria miezului magnetic

Din punct de vedere constructiv miezul magnetic poate fi:

a) *compact* — fără canale radiale de ventilație — pentru diametre mici și lungimi ideale care nu depășesc $20 \div 25$ cm, sau cînd se utilizează, pentru răcire, ventilație axială (cu canale prevăzute în lungul miezului). În acest caz, lungimea geometrică l_g a miezului este

$$l_g = l_{Fe} \approx l_i.$$

b) *divizat* — cu canale radiale de ventilație, ca în figura 1.8 — pentru $l_i \geqslant 25$ cm și $D \geqslant 25 \div 30$ cm. Pentru a fi eficace canalele radiale de ventilație, se va avea în vedere ca diametrul interior al miezului magnetic rotoric D_{ir} al mașinilor cu poli înecați și varianta combinată, să fie mai mare decît diametrul maxim al arborelui; este indicată folosirea unui arbore cu nervuri sudate. În cazul miezurilor divizate rezultă (fig. 1.8):

— lungimea geometrică

$$l_g = l_i + n_v b'_v \text{ [cm]}; \qquad (1.16)$$

— lungimea totală a pachetelor de fier

$$l_{Fe} = (n_v + 1) l_1 \text{ [cm]} \qquad (1.16\ a)$$

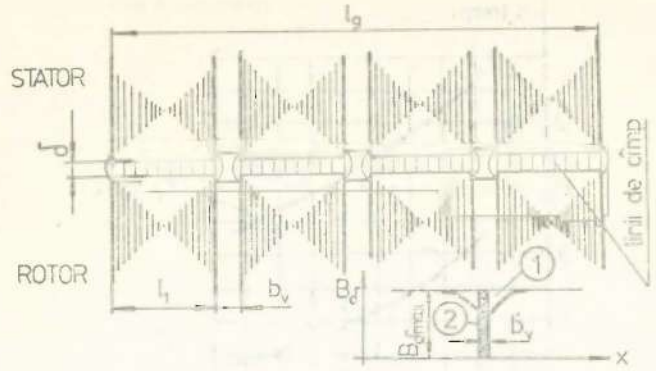


Fig. 1.8 — Construcția divizată a miezului magnetic la mașina sincronă cu poli înecați.

în care:

n_v este numărul canalelor radiale de ventilație;

$b_v = 1 \div 1{,}5$ cm — lățimea canalelor radiale de ventilație;

$l_1 = 4 \div 6$ cm — lățimea unui pachet de fier;

b'_v — cantitatea cu care trebuie micșorată lungimea mașinii pentru un canal (fig. 1.8) astfel încît suprafața dreptunghiului ② să fie egală cu aria ① determinată de scăderea amplitudinii inducției în întrefier B_δ, datorită existenței canalului radial de ventilație.

Valorile lui b'_v în funcție de b_v și δ se determină astfel:

— pentru mașinile cu poli aparenți și varianta combinată (canalele sînt pe o singură armătură)

$$b'_v = 0{,}5 b_v;$$

— pentru mașinile cu poli înecați (canalele sînt pe ambele armături), b'_v se ia din figura 1.9.

Deci, pentru stabilirea geometriei miezului magnetic divizat sînt necesare următoarele etape:

— se impun orientativ n_v, b_v și l_1;

— se calculează l_g cu relația (1.16);

— se calculează lungimea unui pachet de tole

$$l_1 = \frac{l_g - n_v b_v}{n_v + 1}.$$

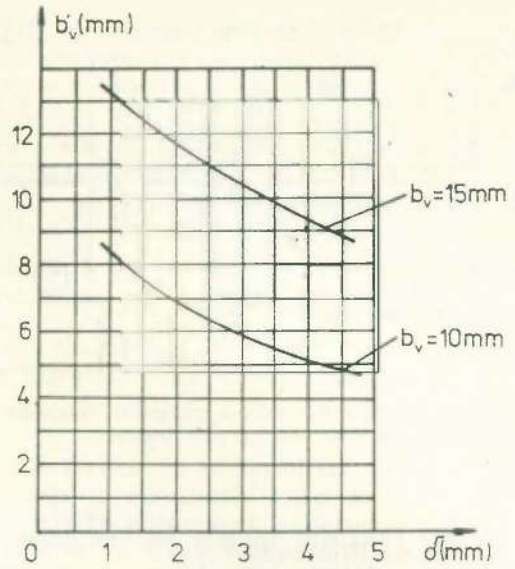


Fig. 1.9 — Valorile lui b'_v, în funcție de δ și de b_v.

și se verifică încadrarea ei în limite ; dacă nu se încadrează se schimbă n_v și se refac etapele parcurse ;

— se determină dimensiunile definitive ale miezului :

$$l_g = (n_v + 1)l_1 + n_v b_v \text{ [cm]} ;$$

$$l_i = l_g - n_v b'_v \text{ [cm]},$$

care trebuie să fie apropiată de cea obținută cu relația (1.15) ;

$$l_{Fe} = (n_v + 1)l_1 \text{ [cm]}.$$

OBSERVAȚIE. Dacă diametrul exterior stator D_e (pentru miezurile statorului) depășește lățimea maximă a tablei silicioase (1 100 mm), atunci tola nu mai poate fi obținută din întregul, pentru realizarea circumferinței miezului fiind necesare segmente de tolă (fig. 1.10).

Pentru realizarea miezului din segmenți trebuie să se respecte următoarele :

— segmentul să aibă un număr întreg de crestături ;

— marginile segmentului să cadă întotdeauna pe mijlocul crestăturilor, nu al dinților ;

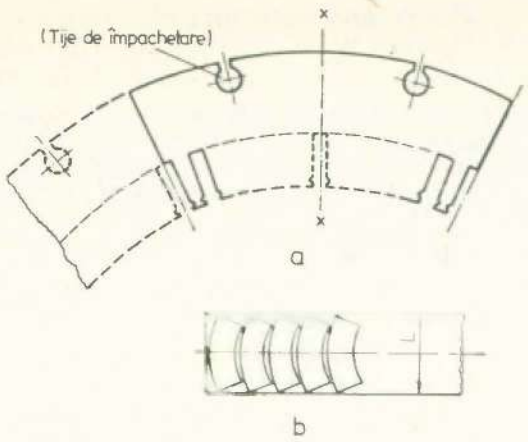


Fig. 1.10 — Segment de tolă stator (a) și planul de ștanțare al acestora (b).

— găurile pentru tijele de strîngere și fixare a segmentului (de împachetare), precum și numărul de crestături ale acestuia, să permită împachetarea prin decalare a straturilor de segmente ; acest lucru este necesar pentru ca la îmbinarea între ele a segmentelor să nu se creeze așa-zisul întrefier de îmbinare care ar duce la nesimetria, pe diferiți poli, a circuitului magnetic.

Relațiile de calcul și geometria miezului, stabilite pentru $D_e < 1\,100$ mm, rămîn valabile și în acest caz.

1.3. SOLICITĂRILE ELECTROMAGNETICE ALE MAȘINII SINCRONE

De valorile solicitărilor electromagnetice depind dimensiunile geometrice ale mașinii, tendința în domeniul construcțiilor de mașini electrice fiind aceea de a crește permanent valoarea acestora. Evident, o serie de factori în special limitele termice admise de clasele de izolație folosite la înfășurări, împiedică o creștere substanțială a solicitărilor și deci reducerea volumului de materiale active folosite în mașină.

Dintre aceste solicitări un rol important îl au A și B_δ, fie prin valoarea produsului lor, așa cum reiese din relațiile (1.10 b) și (1.15), fie prin valoarea raportului lor, de aceasta depinzînd caracteristicile mașinii.

1.3.1. SOLICITĂRILE ELECTRICE

A. **Pătura de curent** A, se adoptă, pentru o anumită clasă de izolație, în funcție de pasul polar τ și numărul perechilor de poli p, din figura 1.7. Se va avea în vedere ca această valoare să se respecte și atunci cînd pătura de curent A, se calculează în funcție de elementele constructive ce o determină (vezi relația (1.26)).

B. **Densitatea de curent**

a) *În înfășurarea statorului* J_1, depinde de clasa de izolație a înfășurării, de tensiunea nominală (înaltă sau joasă tensiune) și de eficacitatea și tipul ventilației.

Astfel, în cazul de față, pentru mașini în construcție protejată cu ventilație de tip axial — radială sau pur radială sau axială, în clasă de izolație F și gamă de turații normală (peste 300 rot/min), se recomandă :

$J_1 = 5 \div 7$ A/mm^2, pentru $U_N \geqslant 1\,000$ V ;

$J_1 = 5{,}5 \div 7{,}5$ A/mm^2, pentru $U_N < 1\,000$ V,

valorile mai mici se referă la mașinile cu $2p$ mare (turație mică), iar valorile mari la mașinile cu turație mare (peste 750 rot/min) ;

b) *în înfășurarea de excitație* J_e

— rotor cu poli aparenți : $J_e = 2{,}5 \div 4$ A/mm^2 ;

— rotor cu poli înecați : $J_e = 4 \div 6{,}0$ A/mm^2 ;

— rotor în variantă combinată : $J_e = 5{,}0 \div 6{,}5$ A/mm^2.

OBSERVAȚIE. Pentru mașinile în construcție închisă, valorile densităților de curent de mai sus, se micșorează cu 10 ÷ 15%.

1.3.2. SOLICITĂRILE MAGNETICE

A. **Inducția în întrefier** (valoarea maximă) B_δ, se adoptă, în funcție de pasul polar τ și numărul perechilor de poli p, din figura 1.7 ; această valoare trebuie respectată și pentru B_δ rezultat din calcul în funcție de elementele constructive ale mașinii (vezi relația (1.27)).

B. **Inducțiile magnetice,** în celelalte porțiuni ale circuitului magnetic (valori maxime).

În etapa actuală de dezvoltare a construcției de mașini electrice cea mai folosită tablă silicioasă pentru tolele miezului magnetic este cea laminată la rece, cu cristale neorientate, cu grosimea de 0,5 mm și izolație de lac sau oxizi, aplicată direct de firma furnizoare.

Această tablă are următoarele caracteristici :

— curba de magnetizare $B = f(H)$ — vezi anexa 2 ;

— $p_{10/50} = 2{,}4$ W/kg, pierderile specifice (pentru masa de 1 kg) la inducția de 1 T și frecvența de 50 Hz ;

— $k_{Fe} = 0{,}95$, coeficientul de umplere al pachetului de tole (de împachetare).

Valorile recomandate, ale inducțiilor în diferite porțiuni ale circuitului magnetic sînt :

y) în jugul statoric : $B_{j1} = 1{,}35 \div 1{,}57$ T ;

b) în dinții statorului :

— *crestături cu pereții paraleli*

— în secțiunea minimă a dintelui :

$$B'_{d1\,max} = 1{,}7 \div 2{,}1 \text{ T} ;$$

— în secțiunea medie a dintelui :

$$B'_{d\,med1} = 1{,}5 \div 1{,}7 \text{ T} ;$$

— *dinți cu pereți paraleli :*

$$B_{d1} = 1{,}4 \div 1{,}7 \text{ T} ;$$

c) la mașinile sincrone cu poli aparenți, inducția în miezul polului este :

$B_m = 1{,}5 \div 1{,}6$ T (obișnuit $B_m = 1{,}55$ T) ;

d) în jugul rotorului cu poli aparenți se recomandă :

$B_{j2} = 1{,}2 \div 1{,}4$ T, dacă jugul este din oțel turnat sau împachetat din tole de oțel ;

$B_{j2} = 0{,}8 \div 1$ T, dacă jugul este turnat din fontă.

OBSERVAȚIE — Pentru varianta cu poli înecați cu miezul magnetic din tablă silicioasă, inducțiile în dinții și în jugul rotorului (valori maxime) se iau apropiate ca la stator.

— **La varianta combinată inducția maximă în dintele mare se ia în limitele :**

$$B'_{dRmax} \leq 1{,}75 \div 1{,}85 \text{ T},$$

iar în jugul rotorului, ca la stator deoarece este impachetat din tole de tablă silicioasă.

1.4. ÎNFĂȘURAREA ȘI CRESTĂTURILE STATORULUI (INDUSULUI)

Ca la orice mașină electrică, înfășurarea mașinii sincrone este cea mai importantă parte, constituind suportul material al curentului și tensiunii electrice. De aceea, împreună cu miezul magnetic care este suportul material al fluxului magnetic, se mai numesc și părțile active ale mașinii, iar materialele folosite (conductoarele și tabla silicioasă) — materiale active.

Construcția și tipul înfășurării depind de o serie de factori, dintre care o pondere însemnată o au în special puterea, tensiunea și tipul de protecție și ventilație al mașinii.

Astfel, pentru mașinile mici ($P_N < 10$ kW) se folosesc de regulă înfășurări într-un strat cu bobine din conductor rotund (sîrmă), crestătura fiind semiînchisă sau semideschisă de formă ovală sau trapezoidală (fig. 1.11).

În acest caz, dintele rezultă cu lățime constantă (pereți paraleli), capetele de bobină fiind cel mai frecvent dispuse

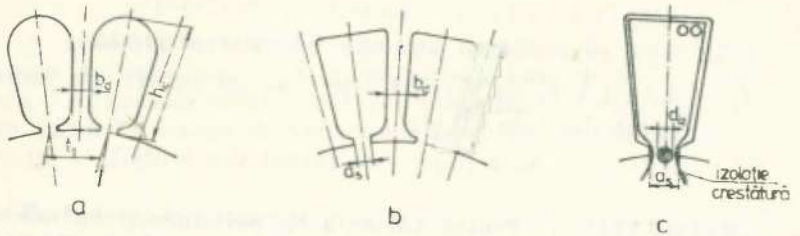


Fig. 1.11 — Crestături ovale sau trapezoidale pentru înfășurarea din sîrmă :
a — ovale ; b — trapezoidale ; c — introducerea conductorului în crestătură.

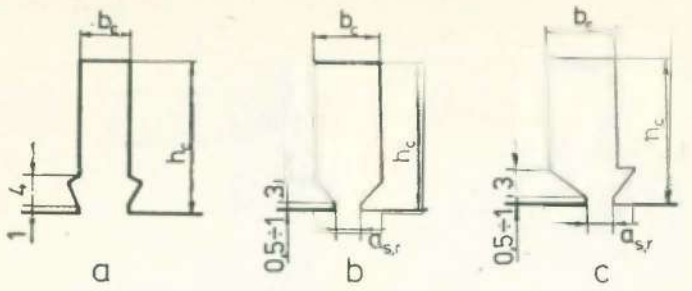


Fig. 1.12 — Forme constructive pentru crestături cu pereții paraleli.

în două etaje. Aceste mașini se construiesc numai pentru joasă tensiune.

Pentru mașinile de puteri medii și mari ($P_N > 10$ kW) se folosesc atît înfășurările într-un strat, cît și în două straturi, pentru joasă tensiune și înfășurare din sîrmă ; crestăturile au aceeași formă ca la mașinile mici (fig. 1.11).

Dacă înfășurarea este din conductor profilat (dreptunghiular) sau din bare, atunci aceasta se construiește numai în două straturi, crestăturile fiind cu pereți paraleli și de forme constructive indicate în figura 1.12.

Schemele de izolație a bobinelor în crestătură și în partea frontală, depind de faptul dacă înfășurarea este de joasă tensiune sau înaltă tensiune și sînt indicate în anexa 7 (tabelul 7-I) și în figura 1.13 b, c, d.

Înfășurarea de înaltă tensiune se construiește numai din conductor profilat. Pentru această înfășurare, care are n_c mare, se pot folosi mai multe variante de dispunere a conductoarelor în bobină și crestătură așa cum se observă și din figura 1.13 a, b, c. În acest caz, izolația crestăturii (a conductorului față de masă) este constituită din însăși izolația bobinei, care are o grosime de 1,5÷2 mm unilateral ; acest lucru îi oferă bobinei o rigiditate mecanică suficientă, din care cauză înfășurarea de înaltă tensiune se mai numește și cu *secții rigide* sau prefabricate (fig. 1.13 b, c și fig. 2.1).

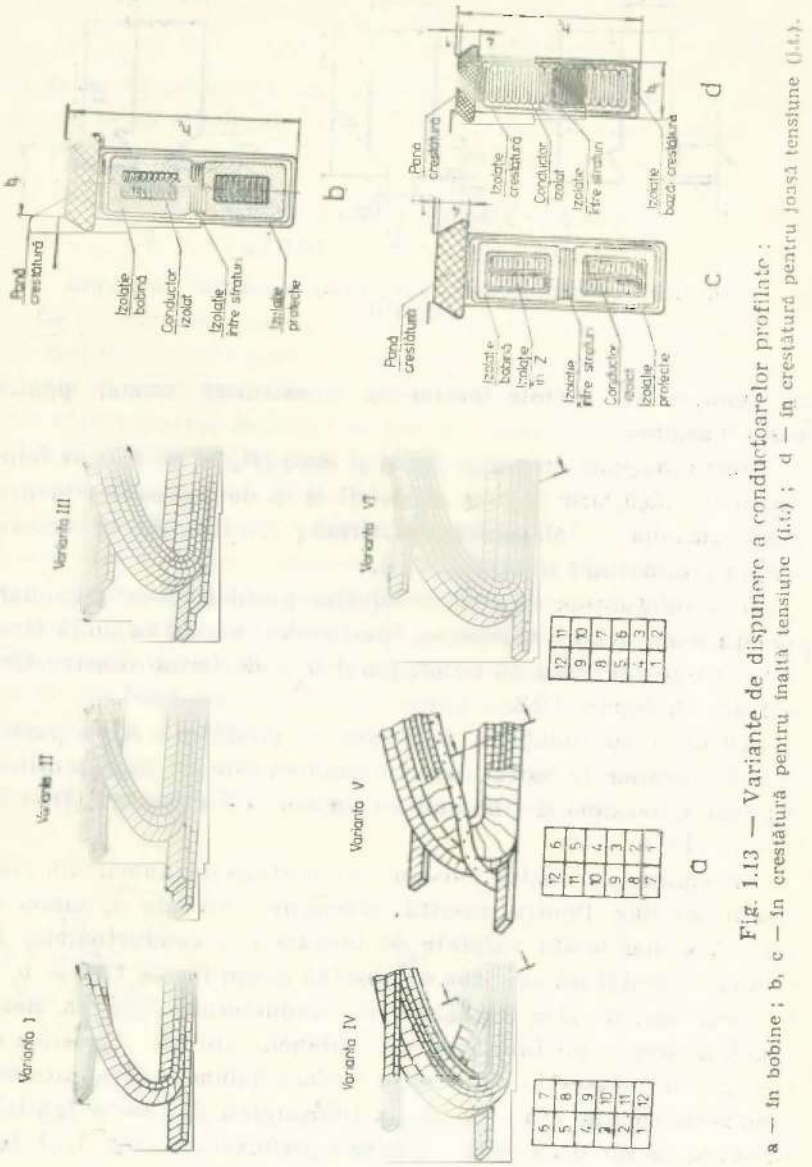


Fig. 1.13 — Variante de dispunere a conductoarelor profilate :
a — în bobine ; b, c — în crestătură pentru înaltă tensiune (î.t.) ; d — în crestătură pentru joasă tensiune (j.t.).

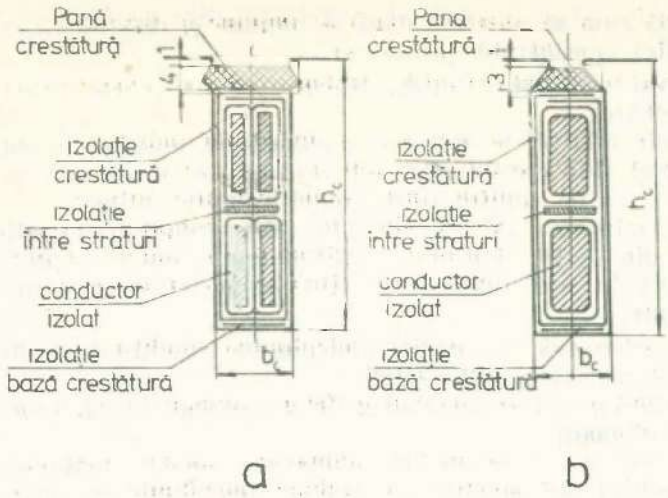


Fig. 1.14 — Crestătură bobinată cu conductor din bară izolată :
a — pentru bobine din bare tip continuu ; b — pentru bobine din semibare (cu mufe de înseriere între ele).

Pentru bobinele neizolate din conductor profilat (de joasă tensiune), izolația crestăturii este prevăzută separat (fig. 1.13 d) ; de asemenea și pentru bobinele din bare (fig. 1.14).

Printre avantajele înfășurării în două straturi este și acela al reducerii armonicilor superioare din curba tensiunii electromotoare printr-o scurtare convenabilă a pasului principal al bobinei.

Astfel pentru o diminuare simultană a armonicilor 5 și 7 din curba tensiunii electromotoare se obișnuiește o scurtare a pasului principal cu 1/6 din pasul diametral, adică :

$$y_1 = \frac{5}{6}\, y_\tau = \text{număr întreg} \qquad (1.17)$$

în care :

$y_\tau = Z_1/2p = mq$, este pasul diametral, în crestături.

1.4.1. NUMĂRUL DE CRESTĂTURI ALE STATORULUI

Numărul de crestături ale statorului este dat de relația :

$$Z_1 = 2pmq$$

în care q este numărul de crestături pe pol și fază.

După cum se observă, dacă se impune q, rezultă Z_1, ceea ce simplifică considerabil problema.

Totuși la stabilirea lui Z_1, trebuie avute în vedere următoarele considerente :

a) din motive de reducere a pulsațiilor inducției în întrefier, în special cînd crestăturile sînt deschise, se recomandă ca pasul dentar t_1 să fie cuprins între anumite limite optime ;

b) diminuarea armonicilor din curba cîmpului magnetic, respectiv din curba tensiunii electromotoare induse, reprezintă o problemă de care trebuie să se țină seama la alegerea tipului de înfășurare.

Se recomandă ca, pentru îndeplinirea condițiilor de mai sus, alegerea lui q să se facă astfel :

— dacă $q \geqslant 4$ se poate alege fie q = număr întreg, fie q = număr fracționar ; (1.18)

— dacă $q < 4$ se preferă numai q = număr fracționar.

Condițiile de simetrie ce trebuie îndeplinite de înfășurările trifazate, indiferent de valoarea lui q sînt următoarele :

— din condiția ca numărul de bobine pe fază și pe calea de curent să fie același rezultă :

— la înfășurarea într-un strat

$$\frac{Z_1}{2ma} = \text{număr întreg} ; \qquad (1.19)$$

— la înfășurarea în două straturi

$$\frac{Z_1}{ma} = \text{număr întreg} ; \qquad (1.19\ a)$$

unde a, este numărul de căi de curent în paralel pe fază ;

— din condiția echilibrării căilor de curent în paralel pe fază, trebuie ca :

$$\frac{2p}{a} = \text{număr întreg} \qquad (1.19\ b)$$

ceea ce înseamnă că $a_{max} = 2p$;

— pentru ca tensiunile electromotoare induse pe fază să fie egale și defazate cu $2\pi/m$ trebuie ca :

$$\frac{Z_1}{mt} = \text{număr întreg} \qquad (1.19\ c)$$

unde t este cel mai mare divizor comun al numărului de perechi de poli p și al numărului de crestături Z_1.

În legătură cu cele menționate la punctul a, se recomandă pentru pasul dentar

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} \text{ [cm]}$$

următoarele limite orientative :

$$0{,}05\tau < t_1 < 0{,}2\tau \qquad (1.20)$$

ceea ce revine la valorile :

1 cm $< t_1 <$ 2,5 cm, pentru mașinile cu τ mic și de joasă tensiune ; (1.20 a)

2 cm $< t_1 <$ 4,5 cm, pentru mașinile cu τ mare și de înaltă tensiune.

Rezultă astfel că pentru determinarea numărului de crestături statorice Z_1 se poate proceda în două moduri :

a) — se impune t_1, în limitele indicate de relațiile (1.20 a) ;

— se recalculează numărul aproximativ de crestături

$$Z_{1ap} = \frac{\pi D}{t_1} = Z_{1min} \div Z_{1max} ;$$

— se determină q corespunzător

$$q_{ap} = \frac{Z_{1ap}}{2pm} = q_{min} \div q_{max} ;$$

— se stabilește q în limitele $q_{min} \div q_{max}$ și se verifică încadrarea lui în recomandările date de relațiile (1.18), apoi se verifică condițiile de simetrie conform relațiilor (1.19 și 1.19 a, b și c) ;

b) — se impune direct q în limitele relațiilor (1.18) ;

— se determină $Z_1 = 2pmq$;

— se verifică condițiile de simetrie conform relațiilor (1.19 și 1.19 a, b și c) ;

— se determină

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} \text{ [cm]}$$

și se verifică încadrarea în limitele orientative date de relațiile (1.20 a).

Repartizarea crestăturilor pe poli și fază, necesară întocmirii schemei înfășurării cu q = număr fracționar se face astfel (vezi tabelul 1.3) :

— fie

$$q = a + \frac{b}{c} = \frac{d}{c} ; \qquad (1.21)$$

— se iau pe orizontală trei compartimente în ordinea A, C, B (nu A, B, C) fiecare compartiment fiind divizat în „d" căsuțe :

— se iau pe verticală „$2p$" coloane în care se înscriu numărul și polaritățile polilor ;

— se completează apoi numărul crestăturilor din „c" în „c" căsuțe rezultînd astfel gruparea crestăturilor (bobinelor) pe pol și fază ;

— se stabilesc începuturile și sfîrșiturile fazelor pentru fiecare cale de curent în parte.

Factorul de înfășurare k_w se determină definitiv, pentru pasul y_1 al înfășurării stabilit pe baza relației (1.17), din anexa 1 sau cu relația (1.9), relație valabilă pentru q număr întreg.

Pentru q = număr fracționar, se utilizează fie anexa 1, fie relația :

$$k_w = k_p k_y = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{d \sin\left(\frac{\pi}{2md}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta_y\right) \qquad (1.22)$$

în care „d" este numărătorul fracției q (vezi relația 1.21)).

Exemplu. Să se facă repartiția crestăturilor pe pol și fază la înfășurarea trifazată în două straturi cu următoarele date :

$$m = 3 ;\ 2p = 10 ;\ Z_1 = 54 ;\ a = 2 ;$$

— verificarea condițiilor de simetrie :

$$\frac{Z_1}{ma} = \frac{54}{3 \cdot 2} = 9 = \text{număr întreg};$$

$$\frac{2p}{a} = \frac{10}{2} = 5 = \text{număr întreg};$$

$$\frac{Z_1}{mt} = \frac{54}{3 \cdot 2} = 9 = \text{număr întreg (deoarece } t = 2) ;$$

— se calculează :

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{54}{10 \cdot 3} = 1\frac{24}{30} = 1 + \frac{4}{5} = \frac{9}{5}$$

de unde rezultă : $a = 1$; $b = 4$; $c = 5$; $d = 9$;

— se întocmește tabelul 1.3.

TABELUL 1.3.

Repartizarea pe poli și fare a crestăturilor

Faza / 2p	A									C									B									
N	1					2				3					4						5					6		
S				7					8				9					10					11				
N		12					13				14					15						16					17	
S					18					19				20					21					22				
N			23					24				25					26					27						
S	28					29				30					31					32					33		
N				34					35				36					37					38				
S		39					40				41					42						43					44	
N					45					46				47					48					49				
S			50					51				52					53					54						

Intrarea fazelor este în începuturile crestăturilor 1 (A_1), 5(B) și 9(C_1) pentru prima cale de curent și în sfîrșiturile crestăturilor 28(A_2), 32(B_2) și 36(C_2) pentru cea de a doua cale de curent, astfel încît să se respecte polaritățile polilor.

Cum se observă din tabelul 1.3, pe fiecare fază există grupe de bobine mici cu cîte „a" (1) bobine și grupe de bobine mari cu cîte „$a + 1$"(1 + 1 = 2) bobine.

La fiecare „c"(5) poli există „$c - b$"(5 − 4 = 1) grupe de bobine mici și „b"(4) grupe de bobine mari, formație care se repetă după fiecare „c" poli.

În continuare, se prezintă particularitățile de calcul ale înfășurărilor turbogeneratoarelor respectiv hidrogeneratoarelor.

La turbogeneratoare numărul de crestături pe pol și fază are valoarea $q = 6 \div 8$; înfășurarea se execută în două straturi, iar capetele de bonină se dispun în coroană (după o suprafață conică) în vederea reducerii piederilor suplimentare în piesele de strîngere ale miezului. Înfășurarea se execută cu pas scurtat, de obicei $y_1 = 0{,}82y_\tau$ pentru a micșora factorul de înfășurare al armonicilor, consumul de material conductor și piederile de suprafață din rotor.

La hidrogeneratoare înfășurarea se execută fie într-un strat, capetele de bobină fiind dispuse în etaje, fie în două straturi cu număr întreg respectiv fracționar (pentru $q < 4$) de crestături pe pol și fază. La alegerea numărului de crestături pe pol și fază,

trebuie să se țină seama de faptul că statoarele care au diametrul mare se execută secționate (în două sau mai multe părți) pentru a ușura transportul și montajul lor și deci, înfășurarea trebuie să permită această secționare.

1.4.2. ELEMENTELE ÎNFĂȘURĂRII STATORULUI (INDUSULUI)

A. **Numărul de spire,** pe fază, rezultă din relația

$$w = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B f_1 k_w \Phi} \qquad (1.23)$$

în care valoarea preliminară a fluxului magnetic maxim este

$$\Phi = \alpha_i \tau l_i B_\delta \quad [\text{Wb}]. \qquad (1.23\ a)$$

Numărul de spire w (valoare definitivă) se stabilește după definitivarea numărului de conductoare în crestătură n_c.

B. **Numărul de conductoare** efective, dintr-o crestătură

$$n_c = \frac{2maw}{Z_1} = \text{număr întreg.} \qquad (1.24)$$

Dacă înfășurarea este din sîrmă, într-un singur strat, atunci n_c poate fi, fie număr par, fie număr impar.

Dacă înfășurarea este însă în două straturi, atunci, pentru motive tehnologice (bobine egale, bobinare mai ușoară) este de preferat ca n_c să fie număr par. Această condiție devine obligatorie, atunci cînd înfășurarea este din bare și cînd de regulă, $n_c \leqslant 6$ (adică $n_c = 2$; 4 sau 6) ; dispunerea conductoarelor în crestătură se face ca în figura 1.14 și anexa 7 (fig. 7-II d și fig. 7-III b și c).

Dacă condițiile de uniformitate ale solicitărilor electromagnetice (A și B_δ) o reclamă, atunci chiar pentru înfășurarea în două straturi se poate lua n_c și număr întreg impar.

În acest caz însă, deoarece bobinele, nu sînt egale, trebuie avute în vedere următoarele :

a) — pasul principal al înfășurării y_1

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} \pm \varepsilon = \text{număr întreg,}$$

scurtat conform relației (1.17) trebuie să fie de preferat *număr întreg impar*, pentru ca în fiecare crestătură să fie o latură a bobinei mari și o latură a bobinei mici (fig. 1.15 b) ;

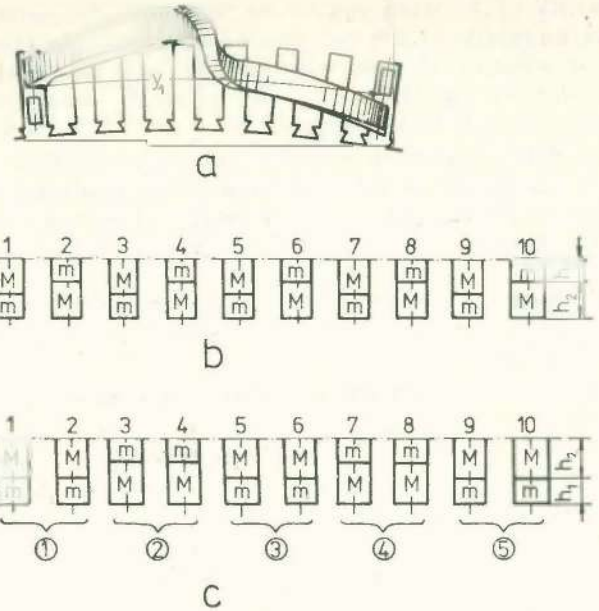


Fig. 1.15 — Dispunerea laturilor bobinelor neegale în crestături :

a — vederea frontală a bobinei ; b — repartizarea bobinelor în crestături pentru y_1=număr impar ; c — repartizarea bobinelor în crestături pentru y_1=număr par, dar $y_1/2$=număr impar (grupe de cîte 2 bobine) ; M — bobina cu numărul mare de spire ; m — bobina cu numărul mic de spire.

b) — pasul principal y_1 al înfășurării, poate fi și *număr întreg par*, însă, trebuie ca $y_1/2$ = număr întreg *numai impar*. În acest caz bobinele neegale se vor grupa două cîte două de același fel (adică două mari și două mici) ; după fiecare $y_1/2$ grupe, în stratul inferior se găsesc aceleași bobine (mici sau mari) ca în stratul superior al primei grupe (fig. 1.15 c). Exemplu : dacă în grupa ①. sus sînt bobine mari, acestea se regăsesc în stratul de jos la grupele pare (②, ④ etc.) ;

c) — diferențele de înălțimi ale laturilor de bobine nu trebuie să fie mai mari de 2÷3 mm (cît este izolația între straturi la înfășurarea de înaltă tensiune), deoarece în acest caz, latura unei bobine mari dintr-un strat de exemplu din crestătura 1, s-ar lovi de latura altei bobine mari din celălalt strat al crestăturii vecine (crestătura 2), ceea ce ar face imposibilă bobinarea.

OBSERVAȚIE. Dacă pentru un anumit a (de exemplu $a = 1$) a rezultat cu relația (1.24) un număr fracționar (de exemplu $n_c = 6{,}5$) se observă că prin adoptarea lui $a = 2$, rezultă $n_c = 13$ direct număr întreg, fără să mai fie necesară rotunjirea la număr întreg (care s-ar fi făcut dacă se lăsa $a = 1$ și $n_c = 6{,}5$).

După definitivarea elementelor înfășurării pentru pasul principal al bobinei y_1, stabilit pe baza celor menționate și corelat cu relația (1.17), se determină cu relația (1.9) sau (1.22) ori din anexa 1, valoarea definitivă a factorului de înfășurare k_w.

C. **Verificări necesare.** Pentru valorile definitive ale numărului de conductoare în crestătură n_c și factorului k_w sînt necesare următoarele calcule de verificare :

a) determinare definitivă a numărului real de spire pe fază :

$$w = \frac{Z_1 n_c}{2ma} = \text{număr întreg}; \qquad (1.25)$$

b) verificarea păturii de curent

$$A = \frac{n_c I_N}{a t_1} \text{ [A/cm]}. \qquad (1.26)$$

Valoarea păturii de curent A, obținută cu relația (1.26) trebuie să fie apropiată de cea obținută din figura 1.7 ; ca limite orientative, se poate considera relația

$$0{,}97 A_{\text{curbe}} < A < 1{,}05 A_{\text{curbe}}; \qquad (1.26\ a)$$

c) verificarea valorii maxime a inducției în întrefier (în axa polului) la sarcină nominală

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} \text{ [T]} \qquad (1.27)$$

în care fluxul maxim la sarcină nominală ($\Phi = \Phi_N$), numit și fluxul nominal (pentru $E_{1N} = k_E U_{1N}$) este

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4 k_B f_1 w k_w} \text{ [Wb]} \qquad (1.27\ a)$$

unde pentru w și k_w se iau valorile definitive obținute cu relația (1.25) și respectiv din anexa 1.

Fluxul nominal, dar la funcționarea în gol (pentru U_{1N}) este

$$\Phi_{0N} = \Phi_N / k_E \text{ [Wb]}. \qquad (1.27\ b)$$

Valoarea lui B_δ, obținută cu relația (1.27) trebuie să fie apropiată de cea adoptată din figura 1.7. Dacă diferența este prea mare, atunci se recalculează, pentru B_δ impus, lungimea ideală

$$l_i = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau B_\delta} \text{ [m]} \qquad (1.27\ c)$$

reconsiderîndu-se geometria miezului magnetic.

Ca limite orientative, se poate considera relația

$$0{,}98\, B_{\delta \text{curbe}} < B_\delta < 1{,}02\, B_{\delta \text{curbe}}. \qquad (1.27\ d)$$

Fluxul undei fundamentale pentru tensiunea nominală (mărimile considerate sinusoidale), este :

$$\Phi_{1N} = \frac{U_{1N}}{\pi \sqrt{2} f_1 w k_w} \text{ [Wb]}. \qquad (1.27\ e)$$

1.1.3. TIPUL ÎNFĂȘURĂRII ȘI DIMENSIUNILE CRESTĂTURII

A. **Secțiunea conductorului** efectiv, de forma căruia depinde în principal tipul înfășurării, se determină cu relația

$$s_{\text{Cu1}} = \frac{I_N}{a J_1} \text{ [mm}^2\text{]} \qquad (1.28)$$

în care densitatea de curent J_1 se alege conform indicațiilor de la paragraful 1.3.1. B.

De mărimea secțiunii conductorului, depinde forma (profilul) lui care la rîndul său impune tipul constructiv al înfășurării și crestăturii.

B. **Tipul înfășurării** și forma crestăturii în funcție de profilul conductorului este indicat, orientativ, în tabelul 1.4.

OBSERVAȚIE. Definirea formei crestăturii deschisă, semideschisă sau semiînchisă, se face astfel (vezi fig. 1.12) :

- **deschisă, cînd $a_s = b_c$ (fig. 1.12 a) ;**
- **semiînchisă, cînd $a_s < b_c/2$ (fig. 1.12 b, c) ;**
- **semideschisă, cînd $b_c/2 < a_s < b_c$ (fig. 1.12 b, c).**

Dacă inițial se preferă un anumit tip de înfășurare, de exemplu din sîrmă, care este foarte convenabilă din punct de vedere tehnologic, atunci secțiunea conductorului efectiv, dată de relația (1.28) se poate obține prin folosirea mai multor fire în paralel n_f. În acest caz, secțiunea unui fir devine secțiunea conductorului elementar s_{cond}, care rezultă din STAS-ul de conductoare. În orice caz, tre-

TABELUL 1.4

Forma conductorului, tipul înfășurării și forma crestăturii, în funcție de secțiunea conductorului

Nr. variantei	s_{Cu1} (mm²)	Forma conductorului (profilul)	Tipul constructiv al înfășurării	Forma crestăturii
I	$s_{Cu1} \leq 6$	Rotund, izolat cu email tereftalic (ET); foarte rar cu email tereftalic și 2 straturi de sticlă (E2S). Clasă de izolație F	Înfășurare din sîrmă cu unul sau mai multe fire în paralel ($n_f \geq 1$), într-un strat, cu pas diametral sau în două straturi cu pas scurtat	Ovală sau trapezoidală (fig. 1.11); $a_s \geq d_{iz} + 1{,}5$ mm. Izolația crestăturii este separată. Se indică pentru mașinile de joasă tensiune
II	$6 < s_{Cu1} \leq 20$	Profilat (dreptunghiular), izolat cu email tereftalic și două straturi de fire din sticlă (PE2S). Clasă de izolație F	Înfășurare din conductor profilat în două straturi cu bobine egale: — neizolate pentru j.t., — izolate (secții rigide) pentru j.t. De obicei $n_c > 6$	Deschisă, de forma indicată în fig. 1.12 a și 1.13 b, c (pentru j.t.). Pentru j.t., izolația crestăturii este separată (vezi fig. 1.13 d)
		Rotund, izolat (ET). Clasă de izolație F	La mașinile de j.t. se pot lua multe fire în paralel și obține o înfășurare din sîrmă	Ovală sau trapezoidală (fig. 1.11)
III	$s_{Cu1} > 20$	Profilat (dreptunghiular) izolat (PE2S) cu o singură bară sau mai multe în paralel (pe lățime). Clasă de izolație F	Înfășurare din bare ($n_c = 2$; 4 sau 6): — de tip continuu;	Deschisă (fig. 1.12 a și fig. 1.14 a)
			— de tip cu mufă de inserare (cu lipituri)	Semideschisă sau semiînchisă (fig. 1.12 b, c și fig. 1.14 b)
		Rotund, izolat (ET). Clasă de izolație F	Pentru j.t., se pot lua multe căi în paralel ($n_i > 1$), și multe fire în paralel ($n_f = 6 \div 10$)	Ovală sau trapezoidală (fig. 1.11)

buie avut în vedere ca la înfășurarea din sîrmă, să se aleagă n_f astfel încît diametrul conductorului să fie cel mult egal cu $2{,}3 \div 2{,}5$ mm, pentru comoditatea bobinării.

În legătură cu tipul înfășurării și problemele constructive ce apar, vezi paragraful 1.8 din „Îndrumarul de proiectare vol. II".

C. **Dimensiunile conductorului și ale crestăturii** se determină similar ca în vol. I punctul 4.4.3 B, în funcție de numărul de conductoare din crestătură n_c stabilit și ținînd cont de următoarele limite ale rapoartelor constructive:

$$\beta = \frac{b_c}{t_1} = 0{,}4 \div 0{,}5;$$

$$\beta_1 = \frac{h_c}{\tau} = 0{,}1 \div 0{,}15; \qquad (1.29)$$

$$\beta_2 = \frac{h_c}{b_c} = 2{,}5 \div 6.$$

Pentru înfășurarea din sîrmă. După calcularea secțiunii cu relația (1.28) și stabilirea numărului de fire în paralel n_f, se alege diametrul conductorului din STAS 685-75, anexa 4, iar diametrul izolat d_{iz}, rezultă în funcție și de indicațiile din anexa 6.

Dimensiunile crestăturii ovală sau trapezoidală (fig. 1.11), se determină prin construcția grafică (la scară mărită) fiind necesare următoarele etape:

— se determină lățimea constantă a dintelui:

$$b_d = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} B_{dadm}} \text{ [m]} \qquad (1.30)$$

în care:

$k_{Fe} = 0{,}95$ (coeficientul de împachetare), pentru tablă de 0,5 mm grosime, laminată la rece cu cristale neorientate și izolată cu peliculă fină de lac;

B_{dadm} — amplitudinea inducției admisibile în dinte care se ia conform indicațiilor de la punctul 1.3.2 B;

— se determină secțiunea netă a crestăturii S'_{cr} (fără pană și istm, neincluzînd nici izolația crestăturii compusă din două folii izolante de NMN „nomex-myler-nomex" cu grosimea de 0,22 mm folia) cu izolația dintre straturi, din relația

$$S'_{cr} = \frac{n_{tot} d_{iz}^2}{k_u} \text{ [mm²]} \qquad (1.31)$$

în care :

d_{iz} este diametrul izolat al conductorului, în mm ;
$n_{tot} = n_c n_f$ — numărul total de conductoare elementare în crestătură ;
$k_u \leqslant 0{,}75$ — coeficientul de umplere a crestăturii ;

— se face construcția la scară, respectînd b_d și variind înălțimea crestăturii, pînă cînd se ajunge cu valoarea măsurată pe desen a secțiunii S'_{cr} la valoarea dată de relația (1.31) ;

— deschiderea crestăturii a_s se ia astfel încît să poată fi introdus în crestătură, conductorul izolat în timp ce este protejat de izolația crestăturii (vezi fig. 1.11 c), adică

$$a_s \geqslant d_{iz} + 1{,}5 \text{ mm}.$$

Pentru înfășurări din conductor profilat sau din bare, cînd crestăturile au pereții paraleli (fig. 1.12), etapele de dimensionare sînt următoarele :

— se impune raportul β, conform relației (1.29) și rezultă :

$$b_c = \beta t_1 = b_{cmin} \div b_{cmax} ; \qquad (1.32)$$

— se stabilește tipul crestăturii (fig. 1.12) și al izolațiilor folosite în funcție de tensiunea mașinii, numărul de conductoare n_c și forma crestăturii astfel :

— pentru înaltă tensiune și conductor profilat, se ia crestătura conform figurii 1.13 b, c (la conductoare așezate pe două rînduri se prevede izolația în „Z", între rînduri, fig. 1.13 c) ;
— pentru joasă tensiune și conductor profilat cu $n_c \geqslant 6$, crestătura conform figurii 1.13 d ;
— pentru joasă tensiune și conductor din bară izolată (PE2S), crestătura conform figurii 1.14 ;

OBSERVAȚIE. Materialele pentru izolațiile specificate în figurile 1.13 b, c, d și 1.14 a, b sînt indicate în anexa 7, tabelul 7-I.

Pentru clasa de izolație F (folosită în etapa actuală) reamintim că ele sînt următoarele (denumirile corespund cu fig. 1.13 b, c, d și fig. 1.14 a, b) :

— Izolația bază crestătură — sticlotextolit gros. 0,5 mm ;
— Izolația între straturi — sticlotextolit gros. 0,5 mm :
1÷2 buc., pentru joasă tensiune ;
4÷6 buc., pentru înaltă tensiune ;

— Izolația crestăturii NMN (nomex-myler-nomex) grosime 0,22 mm, 1÷2 folii (cel mai frecvent două folii suprapuse) ;
— Izolația de protecție mecanică NMN (nomex-myler-nomex) grosime 0,22 mm, un strat (nu este obligatorie la miezurile împachetate bine) ;
— Izolația în „Z", între rînduri — folie izolantă grosime 0,25 mm (sau NMN) ;
— Izolația bobinei (la înaltă tensiune) — teacă izolantă, pe bază de mică, cu grosimea :
1÷1,3 mm, pentru tensiunea $U_N = 1\,000$ V ;
1,8÷2 mm, pentru tensiunea $U_N = 6\,300$ V ;
2,4÷2,6 mm, pentru tensiunea $U_N = 10\,500$ V ;
— Pană crestătură-sticlotextolit cu grosimea de 3÷4 mm.

— se calculează :

b_{iz} — suma grosimilor tuturor izolațiilor pe lățimea crestăturii, inclusiv a conductorului (E2S) și jocul = 0,2÷0,3 mm ;
h_{iz} — suma grosimii tuturor izolațiilor pe înălțimea crestăturii, inclusiv a conductorului (E2S), a istmului crestăturii, a penei de crestătură și jocul = 0,3÷0,5 mm ;

— se determină din limitele lățimii crestăturii (relația (1.32) limitele dimensiunii pe lățimea crestăturii a conductorului

$$b_{Cu} = \frac{b_c - b_{iz}}{\text{nr. conductoarelor pe lățimea crestăturii}} ; \qquad (1.33)$$

— pentru aceste limite ale lui b_{Cu} și pentru s_{Cu1}, determinat cu relația (1.28) se aleg din STAS 2873-76 (anexa 5), dimensiunile definitive ale conductorului : b_{Cu}, h_{Cu}, s_{Cu1} ;

— din anexa 6 se stabilește grosimea bilaterală a izolației, conductorului ;

— se recalculează dimensiunile definitive ale crestături :

$b_c = b_{Cu} \times$ numărul conductoarelor pe lățimea crestăturii $+ b_{iz}$; (1.33 a)
$h_c = h_{Cu} \times$ numărul conductoarelor pe înălțimea crestăturii $+ h_{iz}$.

D. **Verificări necesare**

a) Verificarea încadrării în limite, a inducției în jugul statorului :

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe} l_{Fe} h'_{j1}} \text{ [T]} \qquad (1.34)$$

în care h'_{j1} este înălțimea de calcul a jugului stator.

Cînd nu există canale axiale de ventilație atunci (vezi fig. 1.16 b)

$$h'_{j1} = h_{j1} = \frac{D_t - D}{2} - h_{c1} \text{ [m]}. \qquad (1.34\ a)$$

Limitele admisibile ale inducției sînt indicate la punctul 1.3.2 B.

Dacă valoarea obținută a inducției în jugul stator nu se încadrează în limite atunci, cel mai frecvent se schimbă diametrul interior al statorului D (tot la valori rotunjite).

În cazuri rare (la abateri mici) și corelat cu inducția maximă în dinte (vezi punctul b), se acționează și asupra dimensiunilor crestăturii.

Dacă mașina este prevăzută cu canale axiale de ventilație rotunde (vezi fig. 1.16 b), atunci înălțimea de calcul a jugului din relația (1.34) se determină cu relația

$$h'_{j1} = h_{j1} - \frac{2}{3} m_{a1} d_{a1} \text{ [m]} \qquad (1.34\ b)$$

în care :

d_{a1} este diametrul canalelor axiale ;

m_{a1} — numărul rîndurilor după care sînt așezate canalele axiale (pe înălțimea jugului) ;

h_{j1} — dat de relația (1.34 a).

Cînd canalele axiale sînt dispuse pe un singur rînd : $m_{a1} = 1$.

b) Inducția aparentă maximă în dinte (la baza acestuia, unde secțiunea este minimă) :

$$B'_{d1\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}} \leqslant B_{d\max \text{ admis}}. \qquad (1.35)$$

Limitele lui $B_{d\max \text{ admis}}$ sînt indicate la punctul 1.3.2 B.

Lățimea minimă a dintelui este :

$$b_{d1\min} = t_1 - b_c. \qquad (1.35\ a)$$

c) Valoarea exactă a densității de curent (după definitivarea dimensiunilor conductorului și crestăturii)

$$J_1 = \frac{I_N}{a s_{Cu1}} \text{ [A/mm}^2\text{]} \qquad (1.35\ b)$$

trebuie să se încadreze în limitele indicate la punctul 1.3.1 B.

Pentru înfășurarea cu mai multe fire în paralel

$$s_{Cu1} = n_f s_{cond}$$

în care s_{cond} este secțiunea unui singur conductor rezultată din STAS-ul respectiv, în funcție de dimensiunile (sau diametrul) conductorului.

d) Se calculează rapoartele definitive :

$$\beta = \frac{b_c}{t_1}; \quad \beta_1 = \frac{h_c}{\tau}; \quad \beta_\perp = \frac{h_c}{b_c}$$

care, orientativ, pentru mașinile normale, au valori cuprinse în limitele indicate de relațiile (1.29) (de obicei aceste limite nu sînt obligatorii).

1.5. CALCULUL LĂȚIMII ÎNTREFIERULUI

A. Mașina sincronă cu poli aparenți și varianta combinată

La mașina sincronă, mărimea întrefierului δ se determină astfel încît mașina să aibă o anumită reactanță sincronă longitudinală x_d ; de valoarea acesteia depinde stabilitatea statică a mașinii, capacitatea de suprasarcină, curentul de scurtcircuit în regim permanent și dimensiunile înfășurării de excitație.

În cazul în care δ este mai mare, reactanța sincronă longitudinală are o valoare mică și deci M_{max} și I_k sînt mari.

De obicei pentru mașinile normale cu poli aparenți și varianta combinată

$$x_d = 1 \div 1{,}6 \text{ u.r., în medie } x_d = 1{,}3 \text{ u.r.}$$

Pentru motoarele care trebuie să aibă o capacitate de suprasarcină M_{max}/M_N mărită, se adoptă de obicei $x_d < 1$ mașina avînd însă un cost foarte ridicat, pentru că întrefierul rezultă mare și masa înfășurării de excitație va fi mare (deci G_{Cuex} mare).

La compensatoarele sincrone pentru a avea G_{Cuex} mic, se alege de obicei x_d mare și rezultă δ mic, adică

$$x_d = 1{,}8 \div 2{,}2 \text{ u.r.}$$

Lățimea întrefierului δ, la mașinile sincrone cu poli aparenți și varianta combinată se determină cu relația

$$\delta = \frac{0{,}36 \cdot 10^{-4} A\tau}{k'(x_d - x_{\sigma 1})B_\delta} \text{ [cm]} \qquad (1.36)$$

cu A în A/cm, τ în cm și B_δ în T,

în care :

$x_{\sigma 1}$ este reactanța de scăpări pe fază care se estimează inițial în limitele : $x_{\sigma 1} = 0{,}08 \div 0{,}15$ u.r. ;

k' — coeficient ce ține seama de creșterea tensiunii magnetice a întrefierului, datorită existenței întrefierului parazitar de îmbinare dintre polii și jugul rotorului (vezi relația (1.98)) :

$k' = 1{,}05 \div 1{,}1$ — pentru jugul rotorului din oțel ;

$k' = 1{,}1 \div 1{,}15$ — pentru jugul rotorului din fontă.

Din motive tehnologice, valoarea întrefierului obținută cu relația (1.36) se rotunjește din 0,25 în 0,25 mm.

La mașina sincronă cu rotorul în variantă combinată (vezi fig. 1.18 a) întrefierul dintre piesele polare (în axa transversală) se stabilește aproximativ cu relația

$$\delta_{trans} = (6 \div 8)\delta. \qquad (1.37)$$

B. **Mașina sincronă cu poli înecați**

Pentru mașinile sincrone normale de puteri medii, cu poli înecați, forma curbei cîmpului magnetic în întrefier este dată de repartizarea înfășurării de excitație pe un pas polar. Din aceleași motive ca și la mașina sincronă cu poli aparenți, adică de reducere a distorsionării curbei cîmpului principal de către cîmpul de reacție a indusului, întrefierul δ se determină cu relația

$$\delta = \frac{0{,}46 \cdot 10^{-4} A\tau}{(x_d - x_{\sigma 1})B_\delta} \text{ [cm]} \qquad (1.38)$$

în care mărimile ce intervin au aceleași semnificații și unități de măsură ca și în relația (1.36) de la poli aparenți.

Pentru turbogeneratoare, dacă întrefierul δ se determină din condiții normale de funcționare, în funcție de x_d și de raportul $1/x_d$, se poate utiliza pentru reactanța utilă a cîmpului de reacție longitudinală relația

$$x_{ad} = x_d - x_{\sigma 1} \approx 0{,}563 \cdot 10^{-4} \frac{k_w}{k_C} \frac{\tau}{\delta} \frac{A}{B_\delta} \text{ [u.r.]} \qquad (1.39)$$

din care rezultă întrefierul

$$\delta = 0{,}563 \cdot 10^{-4} \frac{k_w}{k_C} \frac{\tau}{x_{ad}} \frac{A}{B_\delta} \text{ [cm]} \qquad (1.40)$$

unde s-a considerat τ în cm, B_δ în T și A în A/cm.

Ca și la mașinile cu poli aparenți, valoarea lui δ se rotunjește din 0,25 în 0,25 mm.

Orientativ, valorile lui x_d și $x_{\sigma 1}$ în funcție de P_N, în MW, sînt :

— pentru $P_N < 1$ MW se adoptă $x_d = 1{,}1 \div 1{,}6$ u.r. și $x_{\sigma 1} = 0{,}08 \div 0{,}15$ u.r. ;

— pentru $P_N = 1 \div 6$ MW se adoptă $x_d = 1{,}6 \div 1{,}8$ u.r. și $x_{\sigma 1} = 0{,}1 \div 0{,}13$ u.r. ;

— pentru $P_N = 6 \div 50$ MW se adoptă $x_d = 1{,}7 \div 2{,}2$ u.r. și $x_{\sigma 1} = 0{,}11 \div 0{,}14$ u.r. ;

— pentru $P_N = 50 \div 100$ MW se adoptă $x_d = 1{,}75 \div 1{,}8$ u.r. și $x_{\sigma 1} = 0{,}12 \div 0{,}15$ u.r.

În mod special, la acest tip de mașini condiția de bază pe care trebuie să o asigure rotorul este rigiditatea mecanică. De aceea valoarea finală a lui δ se stabilește ținînd cont și de aceste considerente.

1.6. DIMENSIONAREA CIRCUITULUI MAGNETIC AL MAȘINILOR SINCRONE

1.6.1. DIMENSIONAREA STATORULUI ȘI ÎNTREFIERULUI

Dimensionarea circuitului magnetic *al statorului* și a întrefierului s-au făcut odată cu stabilirea dimensiunilor principale și înfășurării indusului, respectiv odată cu calculul lățimii întrefierului.

1.6.2. DIMENSIONAREA ROTORULUI

A. **Mașina cu poli aparenți**

Mașina cu poli aparenți și varianta constructivă combinată prezintă avantajul că forma curbei de repartiție spațială a inducției magnetice în întrefier $B_\delta(x)$ se poate obține cît mai apropiată de sinusoidă în funcție de forma geometrică a piesei polare.

a) *Dimensiunile piesei polare* (fig. 1.16 a)

— Diametrul exterior al rotorului:

$$D_1 = D - 2\delta \text{ [cm]}. \tag{1.41}$$

— Lățimea piesei polare

$$b_p = \alpha_p \tau \text{ [cm]} \tag{1.42}$$

unde α_p s-a impus mai sus (vezi paragraful 1.1.5 B).

— Forma piesei polare.

În cazul în care întrefierul este variabil pentru ca $B_\delta(x)$ să fie sinusoidală ar trebui ca (vezi fig. 1.16 a)

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)}. \tag{1.43}$$

În cazurile practice însă este suficient să se adopte

$$\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5. \tag{1.43 a}$$

Pentru aceste valori, raza de formă a polului rezultă

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_M - \delta)}{b_p^2}} \text{ [cm]}. \tag{1.44}$$

— Înălțimea piesei polare

$$h_p = h_p' + R_p - \sqrt{R_p^2 - \left(\frac{b_p}{2}\right)} \text{ [cm]} \tag{1.45}$$

în care $h_p' = 0{,}6 \div 2$ cm, valoare impusă din condiții mecanice.

Avînd în vedere tot condițiile mecanice valorile lui h_p în funcție de τ se pot aprecia conform tabelului 1.5.

TABELUL 1.5

τ [cm]	30÷50	50÷60	60÷70
h_p [cm]	4÷5	5÷ 6	6,5÷8

b) *Dimensiunile polului*

Polii aparenți se execută cel mai frecvent, din motive tehnologice, prin împachetare din tole de tablă obișnuită cu grosimea de

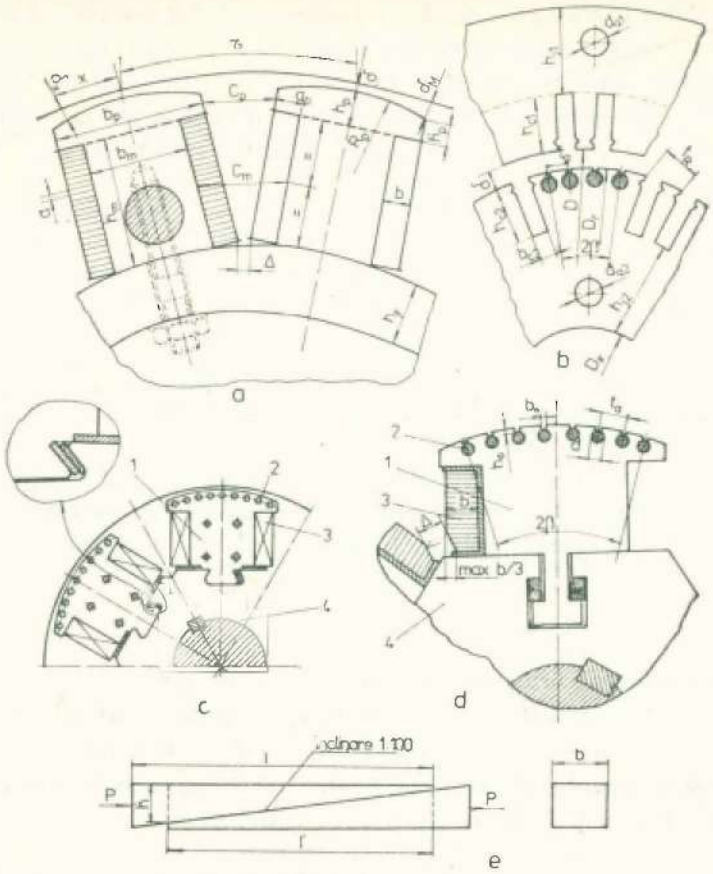


Fig. 1.16 — Construcția rotorului mașinilor sincrone cu poli aparenți fixați cu prezoane (a), fixați cu coadă de rîndunică (c) sau fixați cu coadă în T (d) prin intermediul penelor înclinate (e) și construcția mașinilor sincrone cu poli înecați (b):

1 — pol aparent; 2 — înfășurare de amortizare; 3 — înfășurare de excitație; 4 — jug rotor împachetat din tole ștanțate (butuc împachetat).

1÷2 mm. Modul de fixare a polilor depinde atît de dimensiunile polilor cît și de construcția jugului rotoric. Astfel, la mașinile de turație mică ($2p \geqslant 12$), se preferă fixarea cu șuruburi sau prezoane (fig. 1.16 a) caz în care jugul rotorului (butucul) se face

turnat din fontă sau oțel. La mașinile de turație medie și mare, fixarea se face cu coadă de rîndunică (fig. 1.16 c) sau coadă în T (fig. 1.16 d) cazuri în care jugul rotorului este împachetat din tole de tablă obișnuită cu grosimea de 2÷3 mm ștanțate (din motive tehnologice — pentru reducerea volumului de prelucrări mecanice).

Lățimea polului (fig. 1.16 a)

$$b_m = \frac{\sigma \Phi}{k_{Fem} l_m B_m} \text{ [m]} \tag{1.46}$$

în care :

Φ — determinat conform relației (1.27 a), în Wb ;

B_m — inducția în miezul polului în T, stabilită în limitele indicate la paragraful 1.3.2 B ;

$k_{Fem} = 0{,}97$ pentru tablă de oțel de 1,5÷2,5 mm grosime, reprezintă coeficientul de împachetare al polului ;

l_m — lungimea polului în m.

De regulă

$$l_m = l_g + (1 \div 2) \text{ cm.} \tag{1.47}$$

În cazul în care după dimensionarea înfășurării de excitație, spațiul dintre poli nu este suficient pentru aceasta, atunci se procedează la micșorarea lățimii b_m a polului cu mărirea corespunzătoare a lungimii polului l_m, pentru menținerea în limite a inducției B_m în pol. Se poate ajunge astfel la

$$l_m = l_g + (5 \div 10) \text{ cm.} \tag{1.47 a}$$

Coeficientul de scăpări ale rotorului se determină cu relația:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{\Phi} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} \tag{1.48}$$

în care :

$$\Phi_\sigma = U_{m\delta dj1} \lambda_{sc} \text{ [Wb]} \tag{1.49}$$

unde :

$$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{mdj} + U_{mj1} \text{ [A]}$$

este tensiunea magnetică a întrefierului și statorului calculată (anticipat) conform paragrafului 1.9 ;

$\lambda_{sc} = \lambda_m + \lambda_p$ — permanența totală a cîmpului de scăpări al polului în care (fig. 1.16 a) :

$$\lambda_m = 2\mu_0 l_m \left[\frac{h_m}{2c_m} + \frac{h_m}{\pi l_m} \ln \left(1 + \frac{\pi b_m}{2c_m} \right) \right] ;$$

$$\lambda_p = 2\mu_0 l_p \left[\frac{h'_p}{c_p} + \frac{2h_{pm}}{\pi l_p} \ln \left(1 + \frac{\pi b_p}{2c_p} \right) \right] \tag{1.49 a}$$

sînt permanențele de scăpări în corpul polului (λ_m) și în zona piesei polare (λ_p) ;

$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3}$ — înălțimea echivalentă a piesei polare ;

c_m, c_p — distanțele dintre mijloacele înălțimii polilor, respectiv dintre mijloacele pieselor polare, măsurate din desenul la scară al rotorului.

OBSERVAȚII. 1. Deoarece, în unele cazuri construcția grafică la scară a rotorului, este mai dificilă, atunci, în ipoteza că diferența între arc și coardă este mică (cazul $2p \geqslant 6$) pentru c_p și c_m se pot utiliza valorile obținute din relațiile :

$$c_p = \frac{\pi \sqrt{[D - (2\delta + 2h_p) + h'_p]^2 + b_p^2}}{2p} - b_p \text{ [m]} ; \tag{1.49 b}$$

$$c_m = \frac{\pi \sqrt{[D - (2\delta + 2h_p + h_m)]^2 + b_m^2}}{2p} - b_m \text{ [m]}. \tag{1.49 c}$$

2. Coeficientul σ de scăpări ale rotorului, se poate aproxima preliminar și cu relația

$$\sigma \approx 1 + k_\sigma \frac{35\delta}{\tau^2} \tag{1.50}$$

unde τ și δ se iau în cm, iar coeficientul k_σ se poate aproxima funcție de h_p așa cum rezultă din tabelul 1.6.

TABELUL 1.6

h_p[cm]	2	3	4	5	6	7
k_σ	5,5	7	8,5	10	11	12

Înălțimea polului se determină preliminar în funcție de putere și de numărul de poli ai mașinii astfel :

— pentru mașini cu $P_N < 50$ kW

$$h_m \approx (0{,}3 \div 0{,}2)D - (h_\jmath + \delta) \quad \text{cm}] ; \tag{1.51}$$

— pentru mașini de puteri mijlocii ($S_N \leqslant$) MVA) cu $2p \geqslant 6$

$$h_m \approx 10{,}5\delta + (5 \div 8) \text{ cm sau } h_m \approx (1{,}05 \div \ ,15) b_m \text{ [cm]} ; \tag{1.52}$$

— pentru mașini mari și hidrogeneratoare

$$h_m \approx 0{,}9\tau - 0{,}0074\tau^2 \text{ [cm]} \tag{1.53}$$

în care toate mărimile se iau în cm.

Valoarea definitivă a înălțimii polului h_m se determină pe cale grafică la scară după dimensionarea înfășurării de excitație.

c) *Dimensiunile jugului rotorului*

Înălțimea jugului rotorului :

— pentru jugul împachetat din tole

$$h_{j2} = \frac{\sigma \Phi}{2k_{fem} l_{j2} B_{j2}} \text{ [m]} ; \tag{1.54}$$

— pentru jugul turnat

$$h_{j2} = \frac{\sigma \Phi}{2 l_{j2} B_{j2}} \text{ [m]} \tag{1.55}$$

unde B_{j2}, în T conform paragrafului 1.3.2 B ;

$$l_{j2} = l_m + (10 \div 20) \text{ cm [cm]}.$$

Diametrul interior al rotorului

$$D_{ir} = D - 2(\delta + h_p + h_m + h_{j2}) \text{ [cm]} \tag{1.56}$$

care de regulă se rotunjește din 5 în 5 mm, apoi se recalculează h_{j2} și inducția în jug B_{j2}.

Există situații (mai ales la mașinile cu $2p$ mic) cînd valoarea lui D_{ir}, rezultată din relația (1.56) este mică ($D_{ir} \leqslant 8 \div 10$ cm) sau chiar negativă. Aceasta înseamnă că nu se mai poate prevedea jug rotor separat de arbore. Este indicat în aceste cazuri a se folosi „arborele butuc", cînd jugul rotorului este constituit de însuși corpul arborelui (forjat) pe care se prelucrează cozile de rîndunică pentru prinderea polilor (fig. 1.17).

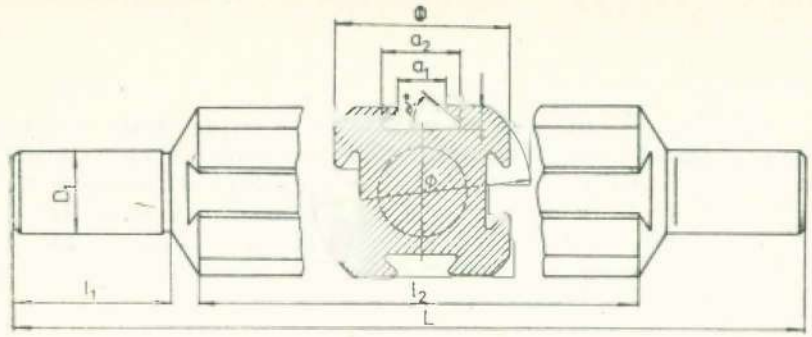


Fig. 1.17 — Arbore butuc pentru $2p=4$.

B. **Mașina cu poli înecați** *(fig. 1.16 b)*

a) *Diametrul rotorului*

$$D_r = D - 2\delta \text{ [cm]}. \tag{1.57}$$

b) *Lungimea rotorului*

La mașinile cu puteri mici și medii ($S_N \leqslant 1\,000$ kVA) miezul magnetic al rotorului (inductorul) se construiește identic cu cel al statorului (divizat sau compact) similar ca la mașină asincronă (din interioarele tolelor stator). Dacă din motive de lipsă a spațiului necesar amplasării înfășurării de excitație, este nevoie, pentru menținerea inducției în fier în limitele necesare, să se lungească miezul magnetic al rotorului, atunci se procedează la mărirea numai a pachetelor de margine, care pot ajunge pînă la 10 cm (pentru a avea suprapunerea canalelor radiale ale rotorului și statorului).

La mașinile la care nu se prevăd canale radiale de ventilație și în rotor, cum este cazul turbogeneratoarelor, lungimea rotorului se stabilește din condiția amplasării înfășurării de excitație și menținerii solicitărilor magnetice din rotor în limite. Rezultă deci

$$l_2 \geqslant l_\jmath. \tag{1.58}$$

c) *Numărul de crestături ale rotorului*

Dacă se notează cu :

Z_2' — numărul de crestături în cazul cînd ar fi uniform repartizate pe periferia rotorului ;

Z_2 — numărul de crestături reale în care se introduce înfășurarea rotorului (de excitație),

atunci se recomandă :

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z_2'} = 0{,}66 \div 0{,}80. \qquad (1.59)$$

Numărul de crestături rotorice Z_2' se alege, de obicei, mai mic decît numărul de crestături ale statorului, pentru a nu slăbi prea mult baza dintelui rotoric. Este necesar ca după stabilirea dimensiunii crestăturii și a dintelui rotorului, acesta să se verifice la solicitările mecanice în secțiunea slăbită. Din motive de amplasare a înfășurării de excitație, numărul de crestături rotorice trebuie să satisfacă relațiile (1.69), adică :

$$\frac{Z_2'}{2p} = \text{nr. întreg}; \quad N_b = \frac{Z_2}{2p} = \text{nr. întreg par.} \qquad (1.59\ a)$$

d) *Dimensiunile crestăturii rotorice* (fig. 1.16 b)
Lățimea crestăturii (orientativ)

$$b_{c2} = (0{,}35 \div 0{,}42) t_R \text{ [cm]} \qquad (1.60)$$

în care :

$$t_R = \frac{\pi D_r}{Z_2'} \text{ [cm]}$$

este pasul dentar al rotorului.

Înălțimea crestăturii (orientativ)

$$h_{c2} = (0{,}13 \div 0{,}175) D_r, \text{ pentru } D_r \leqslant 70 \text{ cm}; \qquad (1.61)$$

$$h_{c2} = (0{,}12 \div 0{,}15) D_r, \text{ pentru } D_r > 70 \text{ cm}.$$

De asemenea se poate estima (orientativ) :

$$h_{c2} = (5 \div 8) b_{c2} \text{ [cm]}. \qquad (1.62)$$

La stabilirea valorilor dimensiunilor crestăturii se va avea în vedere ca inducția maximă la baza dintelui mare să nu depășească $B_{dR\max} = 1{,}75 \div 1{,}85$ T, verificare care este obligatorie.

Verificarea inducției maxime la baza dintelui mare cînd acesta nu este prevăzut cu crestături nebobinate deschise de dimensiuni mari (apropiate de cele bobinate), se face cu relația (1.120), în care fluxul total prin dintele mare Φ_{Dt} este dat de relația (1.119), pe baza relației (1.117) și a fluxului de scăpări care se estimează inițial, adică

$$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma = b_\beta' l_i B_\delta + (\sigma - 1)\Phi_\delta \text{ [Wb]} \qquad (1.62\ a)$$

în care, inițial, se poate aproxima

$$\sigma = 1{,}05 \div 1{,}1.$$

Pentru cazul în care dintele mare este prevăzut cu crestături nebobinate deschise, verificarea inducției maxime la baza dintelui mare se face cu relația (1.122) în care secțiunea minimă este dată de relația (1.122 a), iar fluxul de relația (1.121 a).

e) *Dimensiunile jugului rotorului*
Înălțimea jugului rotorului

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2k_{Fe2} l_{Fe2} B_{j2}} \text{ [cm]} \qquad (1.63)$$

unde :

B_{j2}, în T se impune în conformitate cu indicațiile de la paragraful 1.3.2 B, iar k_{Fe2} se ia în funcție de grosimea tolelor din care este împachetat rotorul.

OBSERVAȚIE. Dacă în jugul rotorului sînt prevăzute canale axiale de ventilație, atunci se va ține cont de ele similar ca la stator (vezi paragraful 1.4.3 D).

Diametrul interior rotor

$$D_{ir} = D_r - 2(h_{c2} + h_{j2}) \text{ [cm]}. \qquad (1.64)$$

Diametrul interior se rotunjește din 5 în 5 mm după care se recalculează inducția reală în jugul rotorului. Dacă miezul rotorului este divizat, se va utiliza arbore cu nervuri pentru a nu obtura canalele radiale.

C. Mașina cu rotorul în variantă combinată

Mașinile sincrone cu rotorul în variantă combinată* (fig. 1.18), prezintă față de variantele clasice (cu poli înecați și aparenți) o serie de avantaje atît economice cît și funcționale [3].

Circuitul magnetic al acestei variante este asemănător cu al mașinii cu poli aparenți ; rolul corpului polului aparent îl are în acest caz dintele mare al rotorului.

Statorul se calculează identic cu cel al mașinii cu poli aparenți, singura deosebire constînd în stabilirea coeficientului de acoperire ideală α_i, conform paragrafului 1.1.5 B pentru care rezultă o lungime l_i mai mică de $(1{,}06 \div 1{,}08)$ ori.

* I. Cioc — cerfiticat de inventator Nr. 57066

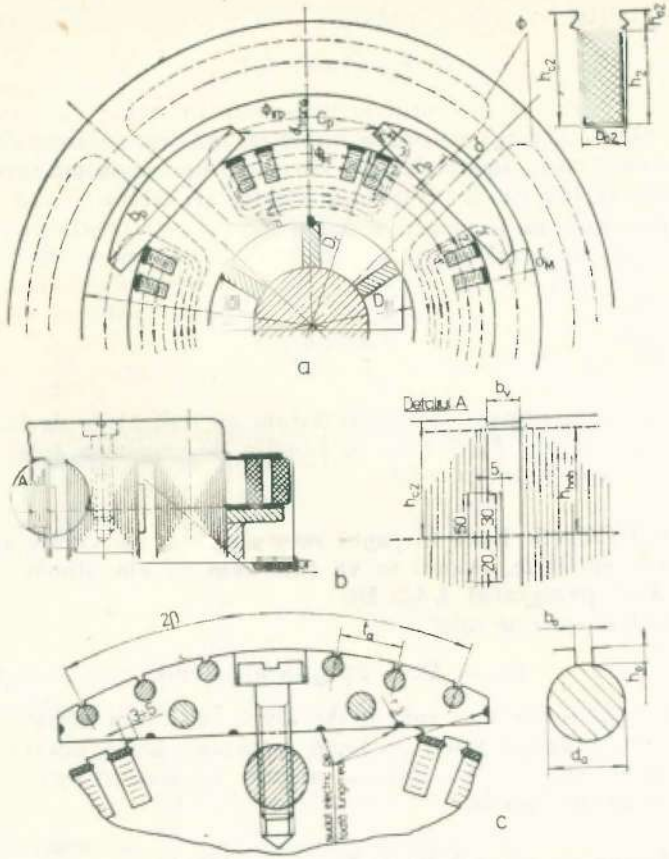


Fig. 1.18 — Mașina sincronă cu rotorul în variantă combinată :

a — secțiune transversală ; b — decuparea distanțorului la baza dintelui rotoric ; c — prinderea piesei polare de dintele mare și dimensiunile crestăturii înfășurării de amortizare.

Rotorul (fig. 1.18 c), are piese polare identice ca la polii aparenți, fixate prin șuruburi de miezul magnetic care este împachetat din tole de tablă silicioasă (din interioarele tolelor stator) și care poate fi divizat sau compact, în funcție de miezul statorului.

a) *Dimensiunile piesei polare*

— Lățimea piesei polare (identic ca la polii aparenți)

$$b_p = \alpha_p \tau \text{ [m]}. \tag{1.65}$$

— Forma piesei polare, identic ca la polii aparenți (vezi mai sus relațiile (1.43) și (1.44)).

— Înălțimea piesei polare (fig. 1.18 a) :

— în axa polului

$$h_p = (0{,}1 \div 0{,}13)\tau \text{ [m]} ; \tag{1.66}$$

— la extremitatea piesei polare

$$h'_p = h_p - R_p + \sqrt{R_p^2 - (b_p/2)^2} \text{ [m]}. \tag{1.66 a}$$

b) *Diametrul miezului magnetic* al rotorului (orientativ)

$$D_r = (1{,}01 \div 1{,}02)[D - 2(\delta + h_p)] \text{ [cm]}. \tag{1.67}$$

Valoarea definitivă se stabilește după dimensionarea crestăturilor, pe desenul la scară, astfel încît să se asigure distanța de $3 \div 5$ mm dintre marginea crestăturii și fața dreaptă de prindere a piesei polare (fig. 1.18 c).

c) *Numărul de crestături* ale rotorului se stabilește astfel :

— se determină numărul de crestături, dacă rotorul ar fi crestat pe toată circumferința sa

$$Z'_2 = (0{,}136 \div 0{,}162) D_r \tag{1.68}$$

cu D_r în mm ;

— se determină numărul real de crestături

$$Z_2 = \gamma Z'_2 = (0{,}5 \div 0{,}7) Z'_2,$$

unde :

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2} = 0{,}5 \div 0{,}7. \tag{1.68 a}$$

Dacă se fac notațiile :

N_D — numărul de crestături nebobinate pe un pas polar;

N_b — numărul de crestături bobinate pe un pas polar,

atunci sînt necesare a se îndeplini următoarele condiții (constructive și de încadrare în limite a solicitărilor magnetice) :

a) $\dfrac{Z'_2}{2p}$ = număr întreg ;

b) $N_b = \dfrac{Z_2}{2p}$ = număr întreg par ; (1.69)

c) $\dfrac{Z'_2}{2p} - \dfrac{Z_2}{2p} = N_D$;

d) $N_D \leqslant N_b$.

d) *Dimensionarea crestăturii rotorului* se face cu relaţiile (orientativ) :

$$b_{c2} = (0{,}45 \div 0{,}55) t_R \text{ [cm]} ; \tag{1.70}$$

$$h_{c2} = (5 \div 7) b_{c2} \text{ [cm]} \tag{1.71}$$

unde

$$t_R = \frac{\pi D_r}{Z_2'} \text{ [cm]}. \tag{1.72}$$

Verificarea inducţiei aparente maxime la baza dintelui mare, se face cu relaţia (1.128)

$$B'_{dR\max} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min}} = \frac{\sigma \Phi}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min}} \leqslant 1{,}75 \div 1{,}85 \text{ T} \tag{1.73}$$

în care fluxurile de scăpări se calculează cu relaţiile (1.124) şi (1.126) iar $b_{DR\min}$ cu relaţia (1.128 a). În această etapă preliminară, se poate estima însă $\sigma \approx 1{,}1$.

Dacă valoarea inducţiei maxime depăşeşte limitele indicate atunci se procedează fie la micşorarea raportului γ spre limita inferioară (vezi relaţia (1.68 a)), fie la mărirea de regulă a lungimii l_{Fe2} a rotorului (a pachetelor de margine, care pot ajunge pînă la $10 \div 15$ cm fiecare, dacă miezul este divizat).

e) *Dimensiunile jugului rotorului* se determină similar ca la maşina cu poli înecaţi cu relaţiile (1.63), respectiv (1.64).

Dacă miezul rotorului este divizat, se va utiliza ca şi la maşina cu poli înecaţi arbore cu nervuri, pentru a permite intrarea aerului în canalele radiale de ventilaţie.

Prinderea piesei polare, se face prin şuruburi cu cap îngropat (cîte un şurub pentru fiecare pachet). De aceea piesa polară se prevede cu un număr par de bare de amortizare, repartizate de o parte şi de alta a şuruburilor aşa cum se indică în figura 1.18 c, deşi pasul acestora t_a se determină ca şi cum ar fi încă o bară în mijlocul piesei polare (adică pentru un număr de bare de amortizare $n_a' = n_a + 1$).

În scopul asigurării unei rigidităţi mecanice suficiente, piesa polară se sudează (după împachetare) cu cîte două-trei cordoane de sudură electrică de fiecare parte, pe toată lungimea, în locaşuri special prevăzute (vezi fig. 1.18 c şi fig. 2.8 b).

Pentru a conferi de asemenea rezistenţa mecanică necesară filetului în care se fixează şurubul, se prevede în dintele mare o

tijă cu diametrul mai mare cu $1.5 \div 2$ cm decît al şurubului ; tija serveşte şi la strîngerea miezului magnetic al rotorului după presare, prin sudare la cele două capete.

ATENŢIE ! Dimensiunile crestăturilor rotorului la maşinile cu poli înecaţi şi varianta combinată (care rezultă de regulă mari), se stabilesc astfel încît lăţimea minimă a dintelui mic al rotorului (la baza sa) să nu fie mai mică de minim 5 mm (se va verifica şi din punct de vedere mecanic). Deoarece la aceste lăţimi mici ale bazei dintelui există pericolul obturării spaţiului de trecere a aerului de ventilaţie prin canalul radial, este absolut necesar ca în această zonă distanţorul să prezinte o decupare de dimensiunile aproximative indicate în figura 1.18 b, detaliul A.

1.7. ÎNFĂŞURAREA DE AMORTIZARE

Înfăşurarea de amortizare se montează în piesele polare ale polilor aparenţi (fig. 1.16 d) sau ale rotorului în variantă combinată (fig. 1.18 c) şi în dintele mare al maşinilor cu poli înecaţi (fig. 1.16 b). Cel mai frecvent barele de amortizare au secţiunea rotundă. În cazul motoarelor sincrone înfăşurarea de amortizare serveşte şi la pornirea în asincron numindu-se, în acest caz, înfăşurare de pornire în asincron.

Înfăşurarea de amortizare se dimensionează, orientativ, din condiţiile unei amortizări corespunzătoare a cîmpurilor de succesiune inversă, ca generator, verificîndu-se apoi la condiţiile de pornire în asincron impuse, ca motor.

Secţiunea totală a barelor pe pol

$$\Sigma s_a = n_a s_a = (0{,}15 \div 0{,}3) \frac{A\tau}{J_1} \text{ [mm}^2\text{]} \tag{1.74}$$

în care :

n_a este numărul barelor pe pol ;
s_a — secţiunea unei bare, în mm² ;
A — pătura de curent, în A/cm ;
τ — în cm ;
J_1 — densitatea de curent din stator, în A/mm².

Pasul crestăturilor înfăşurării de amortizare t_a se stabileşte în funcţie de următoarele considerente :

— micşorarea pe cît posibil a pierderilor în bare date de cîmpurile de succesiune inversă ;

— evitarea fenomenului de lipire la pornirea în asincron ;

— obținerea unor caracteristici de pornire în asincron, ca motor, corespunzătoare.

În aceste condiții, considerînd

$$q = a + \frac{b}{c} = \frac{d}{c}$$

se recomandă :

— pentru $d \leqslant 9$ se preferă $0{,}8t_1 < t_a < t_1$; (1.75)

— pentru $d > 9$ și $q =$ număr întreg, se poate lua $t_a = t_1$ însă numai pentru generatoare. Acestea nu vor putea fi utilizate ca motoare cu pornire în asincron, deoarece va apare fenomenul de lipire ;

— pentru reducerea pierderilor și a fenomenului de lipire (la pornirea în asincron) se impune ca $t_a \neq t_1$, adică

$$(n_a - 1)t_a \approx \frac{6kq}{6q + 1} t_1 \qquad (1.75\ a)$$

în care $k = 1, 2, 3, \ldots$

De asemenea, pentru generatoare, se preferă barele din cupru (pentru pierderi suplimentare mici), iar pentru motoare din alamă (pentru cuplu de pornire mare). În ambele cazuri inelele de scurtcircuitare se fac din cupru.

Numărul de bare pe pol

$$n_a = \frac{b_p - t_a}{t_a} \qquad (1.76)$$

sau în orice caz, trebuie avut în vedere ca marginile piesei polare să prezinte o rigiditate suficientă din punct de vedere mecanic ; la mașinile cu poli înecați, în locul lui b_p se va utiliza lățimea maximă a dintelui mare b_{DRmax}, dată de relațiile (1.128 a).

Se observă că din relațiile (1.75 a) și (1.76) rezultă t_a și n_a. Ca formă barele de amortizare pot fi rotunde sau dreptunghiulare. În general, cele mai utilizate sînt barele rotunde.

Dacă se utilizează bare dreptunghiulare, atunci trebuie ca raportul dimensiunilor acestora h/b să nu fie prea mare deoarece, la înălțimi h mari rezultă înălțimi mari ale pieselor polare. De asemenea, în cazul barelor dreptunghiulare trebuie considerat, cînd se face calculul pornirii în asincron, și fenomenul de refulare al curentului. În mod obișnuit $h/b \leqslant 2 \div 3$, pentru ca rezistența mecanică a marginii piesei polare să fie corespunzătoare ; la mașinile cu poli înecați, raportul h/b poate fi și mai mare.

Pentru coliviile pieselor polare ale rotoarelor în variantă combinată, se vor avea în vedere considerentele menționate la paragraful anterior și anume (fig. 1.18 c) :

— pe mijlocul piesei polare nu se prevede bară de amortizare, din cauza șurubului de prindere ;

— pentru determinarea pasului t_a se va considera însă, în relațiile (1.75 a) și (1.76) un număr de bare $n'_a = n_a + 1 =$ număr impar, ca și cum ar exista și bara din mijloc ;

— numărul barelor reale de amortizare, să fie un număr par ($n_a =$ număr par) ;

— se va prefera *inelul de scurtcircuitare complet.*

În cazul inelelor de scurtcircuitare incomplete (segmente de scurtcircuitare numai pe porțiunea piesei polare) curenții din înfășurarea de amortizare după axa transversală se închid, de la pol la pol, prin masa fierului rotoric solicitînd foarte mult la încălzire șuruburile de prindere a pieselor polare. Aceste solicitări termice combinate cu solicitările mecanice pot duce la ruperea șuruburilor, mai ales în cazul unei funcționări cu regimuri tranzitorii frecvente (șocuri, porniri dese etc.), chiar dacă din punct de vedere mecanic șuruburile au fost dimensionate corespunzător. De altfel, acest fenomen s-a constatat și în exploatare la mașinile sincrone cu regimuri tranzitorii frecvente și cu inel de scurtcircuitare incomplet.

La mașinile cu poli înecați dacă dintele mare nu are crestături, atunci în acesta se pot prevede bare de amortizare asamblate identic ca în piesele polare și cînd este posibil, chiar și în dinții mici de lîngă dintele mare.

Inelele de scurtcircuitare, în acest caz, se vor asambla lipite de miez pe sub suportul de susținere a capetelor frontale ale înfășurării de excitație (vezi fig. 2.11).

Deoarece sînt mai utilizate, în cele ce urmează, se vor considera bare rotunde.

Calculul este identic și pentru barele dreptunghiulare (vezi exemplul de calcul de la paragraful 2.24, punctul 4).

Secțiunea unei bare de amortizare

$$s_a = \frac{\Sigma s_a}{n_s} = \frac{\pi d_a^2}{4}\ [\text{mm}^2]. \qquad (1.77)$$

Cunoscînd s_a se determină diametrul d_a în mm, care apoi se normalizează la valoarea cea mai apropiată din STAS (vezi anexa 8). De obicei pentru M_p mare, dimensiunile istmului se pot lua :

$h_0 = b_0 = 2{,}5$ mm sau $h_0 = 1{,}5$ mm și $b_0 = 3$ mm.

Secțiunea transversală a inelului de scurtcircuitare

$$s_i = (0{,}4 \div 0{,}5) n_a s_a \ [\text{mm}^2] \qquad (1.78)$$

pentru care dinensiunile barei se aleg din STAS (vezi anexa 5, tabelul 5-III sau 5-II).

Tipul inelului influențează considerabil în primul rînd caracteristicile de pornire și funcționarea corespunzătoare a mașinii. Astfel :

— pentru cuplu de pornire M_p mare și în toate cazurile de funcționare cu regimuri tranzitorii frecvente, se preferă inel de scurtcircuitare complet ;

— pentru cuplu de pornire mic (compensatoare) și la funcționarea fără regimuri tranzitorii frecvente, se poate utiliza inel de scurtcircuitare incomplet (segmente de scurtcircuitare separate pe fiecare pol).

1.8. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII INDUSULUI (ÎN REGIM STAȚIONAR)

Pentru calculul caracteristicilor de funcționare, este necesar să se determine parametrii înfășurării statorului și înfășurărilor rotorului raportate la înfășurarea statorului (indusului), precum și reactanțele echivalente corespunzătoare regimurilor de scurtcircuit și constantele de timp. Uzual, parametrii înfășurărilor se calculează direct în unități relative (adică raportați la impedanța nominală $Z_N = U_{1N}/I_N$).

Deoarece în această etapă nu se cunosc încă datele înfășurărilor rotorului (inductorului), adică ale înfășurării de excitație și de amortizare, nu se pot calcula toți parametrii mașinii. De aceea în paragraful de față se vor calcula numai parametrii indusului (statorului) în regim staționar.

1. *Rezistența în c.a. pe fază*

$$r_1 = k_r \frac{R_1 I_N}{U_{1N}} \ [\text{u.r.}] \qquad (1.79)$$

în care :

R_1 este rezistența ohmică pe fază a înfășurării indusului

$$R_1 = \rho_\vartheta \frac{L_1}{s_{Cu1} a} \ [\Omega] \qquad (1.80)$$

unde :

L_1 este lungimea totală a conductoarelor unei faze și unei căi de curent în paralel, în m

$$L_1 = 2wl_{wmed1} \ [\text{m}] ;$$

ρ_ϑ — rezistivitatea materialului conductorului înfășurării la temperatura ϑ, în $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Pentru cupru electrolitic care se folosește la înfășurarea statorului și la temperatura de 20°C

$$\rho_{20} = \frac{1}{56} = 0{,}01784 \ \Omega\text{mm}^2/\text{m}.$$

La temperatura de funcționare ϑ conform STAS 1893-78 rezultă :

— pentru clasa de izolație B cu $\vartheta = 75°\text{C}$

$$\rho_{75} = 1{,}22\rho_{20} ;$$

— pentru clasa de izolație F și H, cu $\vartheta = 115°\text{C}$

$$\rho_{115} = 1{,}38\rho_{20} ;$$

s_{Cu1} este secțiunea efectivă a conductorului real, rezultata din STAS-ul de conductoare, în mm^2 (pentru cazul în care se folosesc n_f fire în paralel, atunci $s_{Cu1} = n_f s_{cond}$, unde s_{cond} este secțiunea din STAS a unui singur fir în paralel) ;

a — numărul căilor de curent în paralel pe o fază ;

w — numărul de spire pe o fază ;

k_r — factorul mediu de creștere a rezistenței în c.a. față de cea în c.c. Calculul exact al lui k_r este indicat în vol. I cap. 6, punctul 6.6.2. Pentru dimensiunile normale ale conductoarelor (în limite tehnologice) și la $f = 50$ Hz, se poate considera $k_r = 1$;

l_{wmed1} — lungimea medie a unei jumătăți de spiră, în m

$$l_{wmed1} = l_\varphi + l_{f1} \ [\text{m}]. \qquad (1.81)$$

Determinarea lungimii frontale a capătului de bobină l_{f1}, se face în funcție atît de tipul înfășurării utilizate, cît și de dimensiunile bobinei.

Astfel pentru înfășurările din sîrmă într-un strat (fig. 1.19) sau în două straturi (fig. 1.20)

$$l_{fmed} = \pi R_m \pm 2A \ [\text{m}] \qquad (1.82)$$

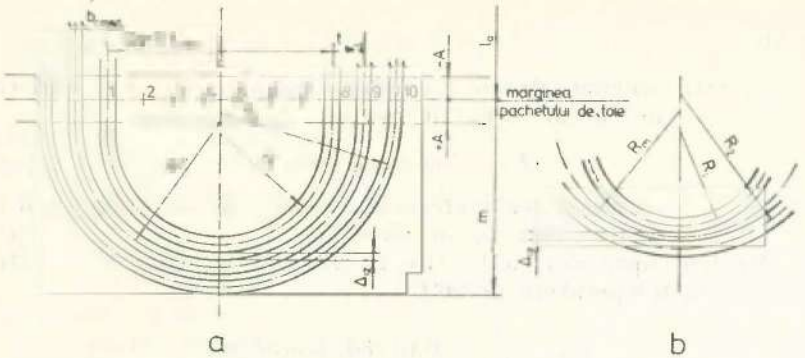


Fig. 1.19 — Dimensionarea capătului de bobină pentru înfășurarea într-un strat, cu capetele grupelor de bobine de aceeași formă ($q=3$).

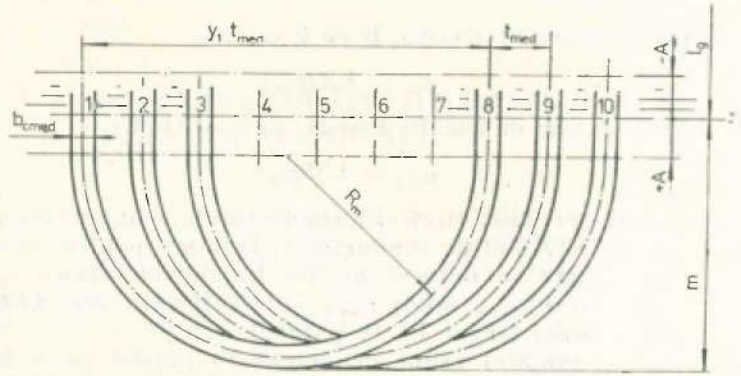


Fig. 1.20 — Capetele de bobine rotunde, pentru înfășurarea din sîrmă în două straturi ($q=3$).

în care valorile lui A în funcție de numărul de poli ai mașinii (pe baza experienței de fabricație) sînt indicate în tabelul 1.7 (semnul (+) pentru A în afara pachetului și semnul (−) în interiorul pachetului).

TABELUL 1.7

Valorile lui A, în funcție de 2p

$2p$	2	4	6	≥ 8
$\pm A$ [mm]	−10	−35	0	+25

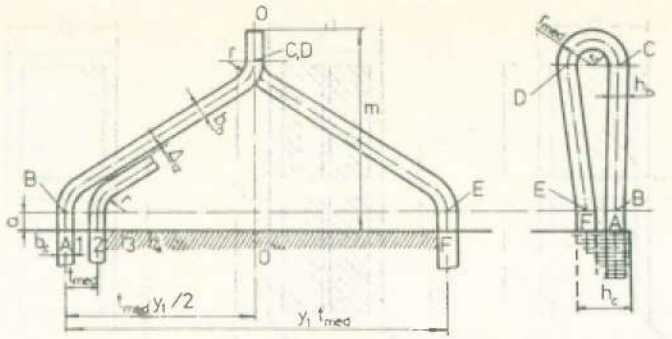


Fig. 1.21 — Determinarea grafică a lungimii frontale a bobinelor în două straturi, din conductor profilat și din bare.

Pentru înfășurările în două straturi din conductor profilat sau din bare, atît pentru joasă tensiune cît și pentru înaltă tensiune, se execută construcția grafică la scară conform figurii 1.21, din care rezultă lungimea frontală măsurată pe bobina desfășurată, adică pe vederea din stînga figurii

$$l_{f1} = l_{ABCDEF} = 2(a + l_{BC}) + \pi r_{med} \text{ [m]} \qquad (1.83)$$

în care :

l_{BC} — se măsoară pe desenul la scară, însă pe vederea desfășurată a bobinei (din stînga figurii), în m ;

$$r_{med} = r_1 + \frac{h_b}{2}, \text{ în m.}$$

În funcție de tensiunea nominală a mașinii, pentru elementele constructive folosite în figură, se recomandă valorile din tabelul 1.8.

TABELUL 1.8

Valorile cotelor capătului de bobină pentru înfășurări în două straturi

	Valorile cotelor [cm]	
	pentru j.t. ($U_N < 1\,000$V)	pentru î.t. ($U_N \geq 1\,000$ V)
a	1,5 ÷ 2,5	3,5 ÷ 5
r	0,5 ÷ 1	3 ÷ 4
r_1	0,5 ÷ 1	1 ÷ 1,5
Δ_{iz}	0,1 ÷ 0,15	0,5 ÷ 0,6

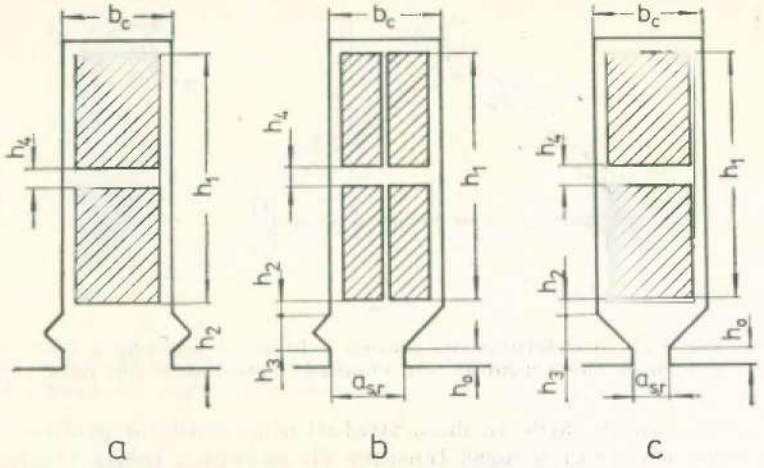


Fig. 1.22 — Crestături cu pereții paraleli, bobinate.

2. *Reactanța de scăpări pe fază*

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} I_N}{U_{1N}} \text{ [u.r.]} \tag{1.84}$$

în care (vezi și vol. II cap. 1, punctul 1.8.3), cu l_i în cm

$$X_{\sigma 1} = 0{,}158 \left(\frac{f_1}{100}\right) \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_i}{pq} \Sigma\lambda_1 \ [\Omega] \tag{1.85}$$

unde :

$$\Sigma\lambda_1 = \lambda_{c1} + \lambda_{d1} + \lambda_{z1} + \lambda_{f1} \tag{1.85 a}$$

este permeanța specifică totală a înfășurării statorului.

Permeanța specifică a scăpărilor în crestătură :

— pentru crestătura din figura 1.22 a

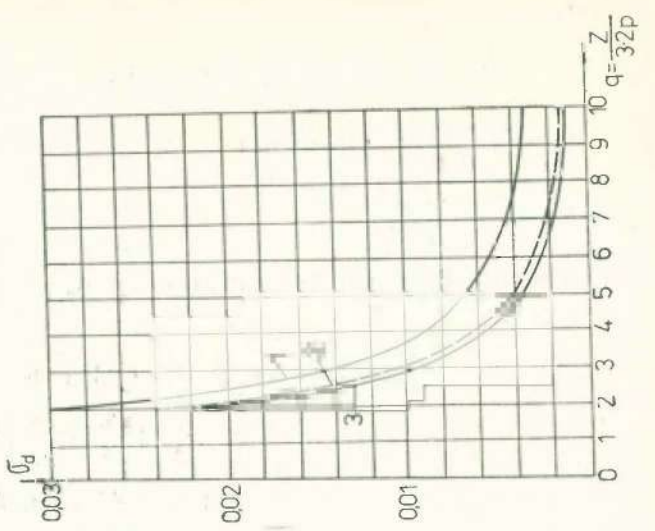
$$\lambda_{c1} = \frac{h_1 - h_4}{3b_c} k_\beta + \frac{h_2}{b_c} k'_\beta + \frac{h_4}{4b_c}; \tag{1.86}$$

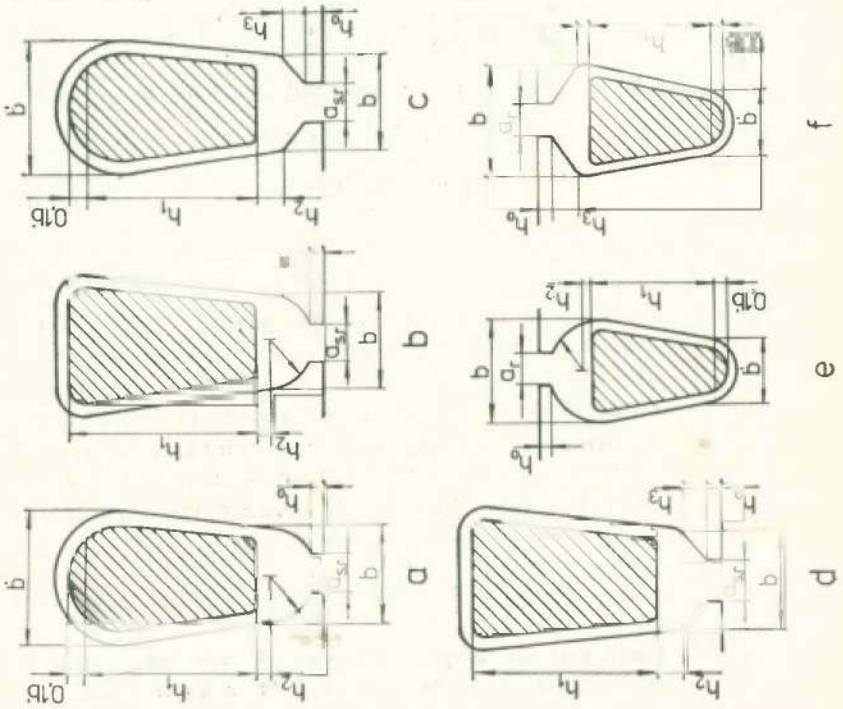
— pentru crestătura din figura 1.22 b, c

$$\lambda_{c1} = \frac{h_1 - h_4}{3b_c} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_c} + \frac{3h_3}{b_c + 2a_{sr}} + \frac{h_3}{a_{sr}}\right) k'_\beta + \frac{h_4}{4b_c} \tag{1.87}$$

Fig. 1.23 — Crestături ovale și trapezoidale, bobinate.

Fig. 1.24 — Valorile lui σ_d pentru înfășurările trifazate, în funcție de $q = \frac{Z}{3 \cdot 2p}$; 1 — pentru $y_1 = y_\tau$ (pas diametral) ; 2 — pentru $y_1 = \frac{5}{6} y_\tau$; 3 — pentru înfășurarea în scurtcircuit (în colivie).





în care :

$$k'_\beta = \frac{1 + 3\beta_y}{4}, \text{ pentru } \frac{2}{3} \leqslant \beta_y < 1;$$

$$k'_\beta = \frac{1 + 3(2 - \beta_y)}{4}, \text{ pentru } 1 < \beta_y \leqslant 2; \qquad (1.87\ a)$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} k'_\beta.$$

Pentru înfășurările într-un strat cu $\beta_y = 1$ (pas diametral) $k'_\beta = 1$; $k_\beta = 1$;

— pentru crestăturile din figura 1.23 a, b, c :

$$\lambda_{c1} = \frac{h_1}{3b} k_\beta + \left(0{,}785 - \frac{a_{s,r}}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_0}{a_{s,r}}\right) k'_\beta ; \qquad (1.88)$$

— pentru crestăturile din figura 1.23 c, d, f :

$$\lambda_{c1} = \frac{h_1}{3b} k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b + 2a_{s,r}} + \frac{h_0}{a_{s,r}}\right) k'_\beta \qquad (1.89)$$

în care k'_β și k_β se determină tot cu relațiile (1.87 a).

Permeanța specifică a scăpărilor diferențiale :

$$\lambda_{d1} = 0{,}9 \frac{t_1 (q k_w)^2 \rho_{d1} k_{01}}{k_C \delta} \sigma_{d1} \qquad (1.90)$$

în care :

t_1, în cm ; δ, în cm ;

k_C este coeficientul lui Carter (pentru mașina cu poli înecați se ia k_C echivalent dat de relația (2.226 c) de la exemplul de calcul) ;

q — numărul de crestături pe pol și fază (valoarea reală) ;

ρ_{d1} — coeficientul de amortizare a cîmpului armonicilor superioare, care pentru mașina sincronă $\rho_{d1} \approx 1$;

k_{01} — coeficient care depinde de deschiderea crestăturilor, de întrefier și de pasul dentar

$$k_{01} \approx 1 - 0{,}033 \frac{a_s^2}{\delta t_1} ; \qquad (1.91)$$

σ_{d1} — coeficient de scăpări diferențiale ale înfășurării statorice care se ia din figura 1.24 și figura 1.25.

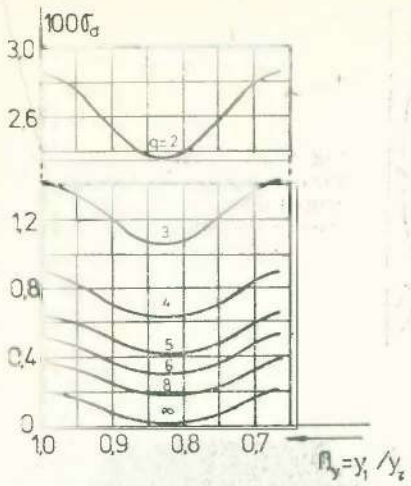


Fig 1.25 — Dependența lui $100\,\sigma_d$ de q și de pasul relativ al înfășurării ($\beta_y = y_1/y_\tau$), pentru înfășurarea trifazată.

La folosirea curbelor din figura 1.25 se ține cont că pentru o anumită valoare a lui β_y, coeficientul σ_{d1} variază invers proporțional cu q^2.

Permeanța specifică a scăpărilor prin capetele dinților

$$\lambda_{z1} = \frac{5\frac{\delta}{a_s}}{5 + 4\frac{\delta}{a_s}} \cdot \frac{3\beta_y + 1}{4}. \qquad (1.92)$$

Permeanța specifică a scăpărilor în părțile frontale

Pentru înfășurarea statorului se disting următoarele cazuri :

— într-un strat cu capetele în două etaje

$$\lambda_{f1} = 0{,}67 \frac{q}{l_i} (l_{f1} - 0{,}64\tau) ; \qquad (1.93)$$

— într-un strat cu capetele în trei etaje

$$\lambda_{f1} = 0{,}47 \frac{q}{l_i} (l_{f1} - 0{,}64\tau) ; \qquad (1.94)$$

— în două straturi cu bobine ondulate sau buclate, într-un strat în lanț și într-un strat cu capetele grupelor de „q" bobine de aceeași formă (fig. 1.26 și 1.27)

$$\lambda_{f1} = 0{,}34 \frac{q}{l_i} (l_{f1} - 0{,}64\beta_y\tau). \qquad (1.95)$$

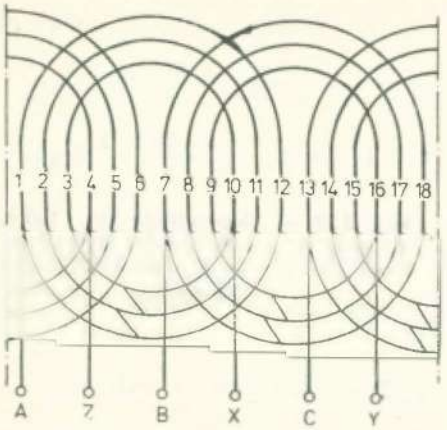


Fig. 1.26 — Schema unei înfășurări cu capetele frontale ale grupelor de bobine de aceeași formă și $q=3$ (pentru o pereche de poli).

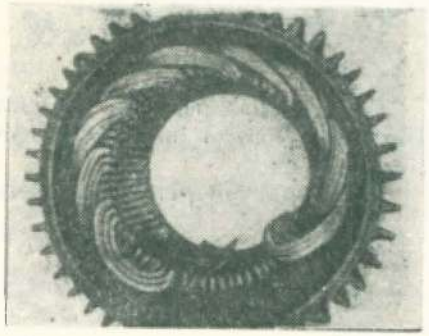


Fig. 1.27 — Bobinarea unui stator ($2p=8$; $q=3$) cu înfășurarea într-un strat avînd capetele grupelor de bobine de aceeași formă.

3. *Reactanțele utile (nesaturate) corespunzătoare fluxului de reacție a indusului*

a. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție longitudinală a indusului (pentru mașini cu poli aparenți și varianta combinată)*

Se determină din condiția ca deformarea cîmpului principal de către cîmpul de reacție a indusului să fie în limitele admisibile. Astfel, în unități relative, conform [13]

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{k' U_{m\delta 0}} \text{ [u.r.]} \qquad (1.96)$$

în care :

k_{ad} este coeficientul de raportare după axa longitudinală a solenației de reacție a indusului (stator) la inductor (rotor) ;

F_a — amplitudinea fundamentalei solenației de reacție a indusului pe o pereche de poli, care se calculează cu relația :

$$F_a = 0{,}9m \frac{wk_w}{p} I_N \text{ [A]} ; \qquad (1.97)$$

$U_{m\delta 0}$ — t.m. a întrefierului la funcționarea în gol, pe o pereche de poli, corespunzătoare tensiunii nominale U_{1N} (nu t.e.m. nominale E_{1N}). Se determină cu relația (1.107), în care se ia $B_{\delta 0} = B_\delta / k_E$ sau se ia din tabelul 1.9, din coloana pentru U_{1N} ;

k' — coeficient ce ține seama de creșterea tensiunii magnetice a întrefierului principal, datorită întrefierului de îmbinare dintre poli și jugul rotorului

$$k' = \frac{U_{m\delta} + U_{m\delta\, imb}}{U_{m\delta}} = 1 + \frac{U_{m\delta\, imb}}{U_{m\delta}} . \qquad (1.98)$$

Pentru valorile normale ale întrefierului parazit de îmbinare rezultă :

$k' = 1{,}05 \div 1{,}1$ pentru juguri din oțel ;

$k' = 1{,}1 \div 1{,}15$ pentru juguri din fontă.

b. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție transversală a indusului (pentru mașini cu poli aparenți și varianta combinată)*

Similar ca reactanța longitudinală, în u.r. rezultă

$$x_{aq} = \frac{k_{aq} F_a}{U_{m\delta 0}} \cdot \frac{1 + k_\sigma}{2} \text{ [u.r.]} \qquad (1.99)$$

în care :

k_{aq} este coeficientul de raportare după axa transversală a solenației de reacție a indusului (stator) la inductor (rotor).

OBSERVAȚIE. Conform figurii 1.28 în care

$$F_d = F_a \sin \psi \text{ [A]} ; \qquad (1.100)$$

$$F_q = F_a \cos \psi \text{ [A]},$$

rezultă că cele două componente ale amplitudinii solenației de reacție a indusului acționează în stator după axa longitudinală (F_d) și după axa transversală (F_q). Celor două componente reale din

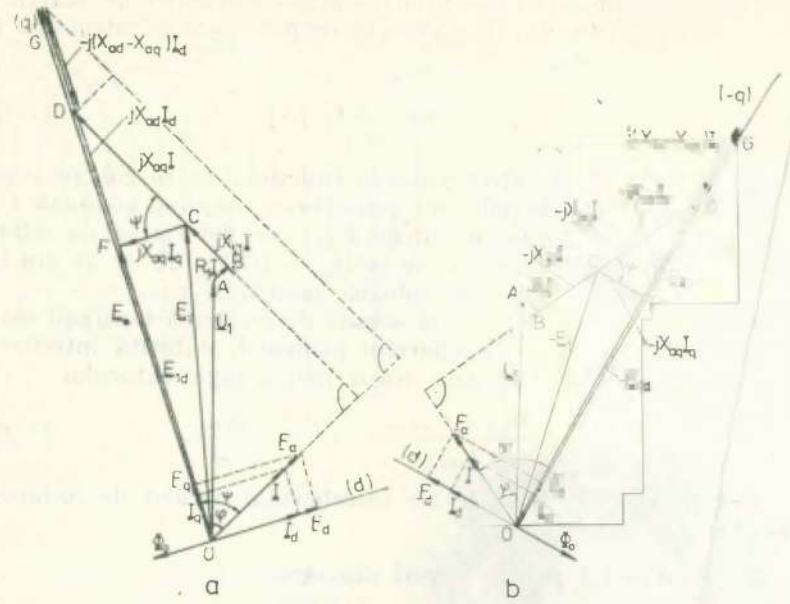


Fig. 1.28 — Diagrama fazorială a mașinii sincrone cu poli aparenți : *a* — generator inductiv ; *b* — motor capacitiv.

indus F_d și F_q, le corespund alte două componente, după axa longitudinală (F_{ad}) și după axa transversală (F_{aq}), echivalente cu primele două, care acționează însă în rotor (în înfășurarea de excitație). Pentru a fi echivalente, trebuie ca amplitudinile fundamentalelor din rotor să fie egale cu cele corespunzătoare din stator, adică :

$$F_{ad} = k_{ad}F_d = k_{ad}F_a \sin \psi \text{ [A]} ; \qquad (1.100\text{ a})$$

$$F_{aq} = k_{aq}F_q = k_{aq}F_a \cos \psi \text{ [A]}.$$

Din compararea relațiilor (1.100) și (1.100 a) reiese semnificația fizică a celor doi coeficienți de raportare k_{ad} și k_{aq}.

Valorile coeficienților k_{ad} și k_{aq} care depind atît de forma curbei solenației de reacție, cît și de forma cîmpului principal (deci de forma polului) sînt indicate, pentru mașinile cu poli aparenți, în figura 1.29.

Pentru mașinile cu *rotorul în variantă combinată*, k_{ad} este identic cu cel al mașinilor cu poli aparenți similari (cu aceeași piesă polară). Deci și pentru mașinile cu rotorul în variantă com-

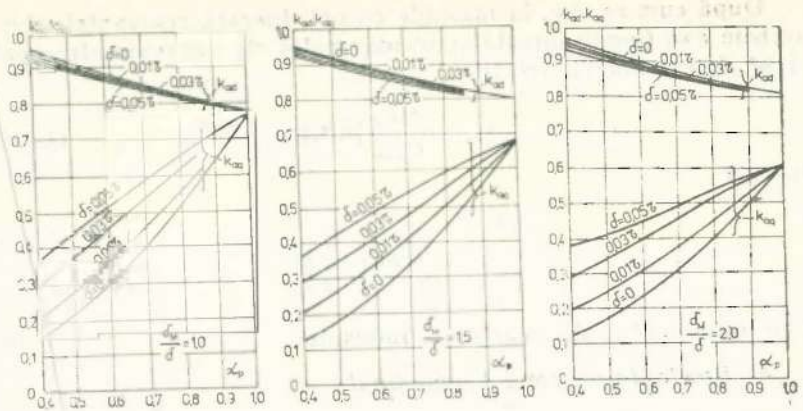


Fig. 1.29 — Coeficienții k_{ad} și k_{aq} în funcție de α_p, δ_M/δ și δ/τ, pentru mașinile sincrone cu poli aparenți.

binată, coeficientul k_{ad} se determină tot din figura 1.29, pentru α_p, δ_M/δ și δ/τ respectivi.

Coeficientul k_{aq}, diferă însă la mașinile cu rotorul în variantă combinată, față de cel cu poli aparenți, în sensul că are o valoare mai mare, deoarece δ_{transv} (fig. 1.18 a), din axa q este mai mic la varianta combinată decît la rotorul cu poli aparenți.

Astfel, dacă se notează

$$k = \frac{\delta_{transv}}{\delta} ; \qquad (1.101)$$

atunci coeficientul k_{aq}, pentru varianta combinată se determină cu relația [3]

$$k_{aq} = \frac{k-1}{k} k_{aq(p.a.)} + \frac{1}{k} \qquad (1.102)$$

în care $k_{aq(p.a.)}$ este coeficientul k_{aq} al mașinii *cu poli aparenți similară*, determinat (pentru α_p, δ_M/δ și δ/τ ale variantei combinate) din figura 1.29.

c. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție a indusului (pentru mașinile cu poli înecați)*

După cum se știe, la mașinile cu poli înecați, reactanțele după ambele axe (longitudinală și transversală) sînt aproximativ egale și se determină cu relația:

$$x_a = \frac{k_a F_a}{U_n \delta_0} \text{ [u.r.]} \qquad (1.103)$$

în care:

$$k_a = \frac{\pi^2 \gamma}{8 \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)} \qquad (1.103\text{ a})$$

este coeficientul de reacție a indusului.

4. *Reactanța sincronă longitudinală*

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma 1} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.104$$

5. *Reactanța sincronă transversală*

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma 1} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.104\text{ a})$$

6. *Reactanța sincronă (la mașinile cu poli înecați)*

$$x_d = x_a + x_{\sigma 1} \text{ [u.r.]} \qquad (1.104\text{ b}$$

(a se vedea și relațiile (1.167) și (1.167 a)).

7. *Reactanța homopolară*

— Pentru mașinile *cu poli aparenți și varianta combinată*, conform [11]

$$x_0 = \frac{\pi \mu_0 F_a l_i}{k_w^2 \Phi_{1N}} \cdot \frac{2p}{Z_1} (\lambda_{c0} + \lambda_{f0}) + 4 \frac{0{,}5 x_{ad}}{k_{ad} k_w^2} \left(\beta_y - \frac{2}{3}\right) \cdot \left[\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2 + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}\left(\beta_y - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta_y - \frac{2}{3}\right)^2\right] \text{[u.r.]} \qquad (1.105)$$

în care:

λ_{c0} este permeanța specifică a scăpărilor în crestătură, pentru curenții homopolari, care pentru crestături dreptunghiulare deschise (fig. 1.22 a) este

$$\lambda_{c0} = \frac{1}{b_c}\left[(3\beta_y - 2)h_2 + (9\beta_y - 5)\frac{h_1}{12} - (9\beta_y - 8)\frac{h_4}{12}\right] \qquad (1.105\text{ a})$$

unde:

$\beta_y = y_1/y_\tau$ — pasul relativ (vezi și relația (1.9 a)).

Pentru crestăturile din figura 1.22 b și c se poate lua cu aproximație, pentru h_2 din relația (1.105 a) valoarea $h_2 = h_0 + h_3 + h_2 =$ = distanța de la partea superioară a conductorului la exteriorul crestăturii;

λ_{f0} — permeanța specifică a scăpărilor frontale, pentru curenții homopolari

$$\lambda_{f0} = (0{,}2 \div 0{,}5)\lambda_{f1} \qquad (1.105\text{ b})$$

unde λ_{f1}, este permanența specifică a scăpărilor frontale pentru curenții de succesiune directă, dată de relația (1.93), (1.94) sau (1.95) (limitele mici se iau pentru înfășurarea în două straturi, iar limitele mari, pentru înfășurarea într-un strat). Pentru Φ_{1N}, vezi relația (1.27 e), iar l_i, în m.

— Pentru mașinile *cu poli înecați*, conform [13], pentru $\beta_y \geqslant \frac{2}{3}$ și figura 1.22 a

$$x_0 = k_x \frac{2l_i'}{Z_1} \lambda_{c0} + 1{,}57 x_{ad}\left(\beta_y - \frac{2}{3}\right)\frac{1}{k_a k_w^2}\left[\left(\frac{2}{Z_1}\right)^2 + 0{,}037 + 0{,}39\left(\beta_y - \frac{2}{3}\right) - \left(\beta_y - \frac{2}{3}\right)^2\right] \text{[u.r.]} \qquad (1.106)$$

în care:

$k_x = 0{,}235\left(\frac{w}{10}\right)^2 \frac{I_N}{U_{1N}} \cdot 10^{-2}$, pentru frecvența $f_1 = 50$ Hz; (1.106 a)

$l_i' \approx l_g - 0{,}2 n_v b_v$ [m], pentru miezurile divizate;
$l_i' = l_g$ [m], pentru miezurile compacte;
w — numărul de spire pe fază dat de relația (1.25).

Pentru crestăturile de forma din figura 1.22 b și c este valabilă indicația de mai sus, adică se poate lua în relația (1.105 a) $h_2 = h_0 + h_3 + h_2$.

1.9. CARACTERISTICILE MAGNETICE ȘI SOLENAȚIA DE EXCITAȚIE LA SARCINĂ NOMINALĂ

În acest paragraf se calculează mai întîi tensiunile magnetice, apoi se calculează și trasează grafic caracteristicile magnetice cu ajutorul cărora se determină solenația de excitație la sarcină nominală.

1.9.1. TENSIUNILE MAGNETICE (t.m.) ÎN DIFERITELE PORȚIUNI ALE CIRCUITULUI MAGNETIC

A. **T.m. a întrefierului principal,** pentru o pereche de poli

$$U_{m\delta} = 2\frac{B_\delta}{\mu_0} k_C \delta \ [\text{A}] \qquad (1.107)$$

în care :

B_δ este inducția maximă în întrefier determinată cu relația (1.27), în T ;
δ — întrefierul principal, în m ;
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m ;
k_C — coeficientul lui Carter.

Cînd există crestături pe ambele armături atunci

$$k_C = k_{C1} k_{C2} \qquad (1.108)$$

unde :

k_{C1} este coeficientul lui Carter pentru stator (indus) ;
k_{C2} — coeficientul lui Carter pentru rotor (inductor) corespunzător crestăturilor din zona piesei polare, la mașinile cu poli aparenți și varianta combinată sau din zona dintelui mare, la mașinile cu poli înecați.

Coeficientul lui Carter pentru stator (1) sau pentru rotor (2) se determină cu relația :

$$k_{C1,2} = \frac{t_{1,2}}{t_{1,2} - \gamma_{1,2}\delta} \qquad (1.108\ a)$$

cu :

$$\gamma_{1,2} = \frac{\left(\frac{a_{1,2}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_{1,2}}{\delta}} \qquad (1.108\ b)$$

în care :

$t_{1,2}$ este pasul dentar al crestăturilor statorului (1) respectiv al crestăturilor rotorului (2) din zona piesei polare (al înfășurării de amortizare), la mașinile cu poli aparenți și varianta combinată sau din zona dintelui mare (al înfășurării de amortizare ori al crestăturilor nebobinate deschise), la mașinile cu poli înecați ;

$a_{1,2}$ — deschiderea crestăturilor (sau istmurilor crestăturilor) statorului (1) respectiv rotorului (2) din zona piesei polare sau a dintelui mare (a istmurilor crestăturilor înfășurării de amortizare ori deschiderea crestăturilor nebobinate ale dintelui mare, dacă penele acestora sînt nemagnetice).

B. **T.m. a dinților indusului** (statorului), pentru o pereche de poli

$$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1} \ [\text{A}] \qquad (1.109)$$

în care :

h_{c1} este înălțimea crestăturii statorului, în cm ;
H_{d1} — intensitatea cîmpului magnetic în dintele statorului, în A/cm.

În cazul în care dinții au pereți paraleli (b_{d1} = const.), H_{d1} se ia din curba de magnetizare, în funcție de valoarea inducției în dinte B_{d1} (vezi relația (1.30)) și de calitatea tolei utilizată (anexa 2).

În cazul crestăturilor cu pereți paraleli (dinte trapezoidal cu $b_d \neq$ constant) intensitatea cîmpului magnetic H_d variază cu înălțimea dintelui (fig. 1.30).

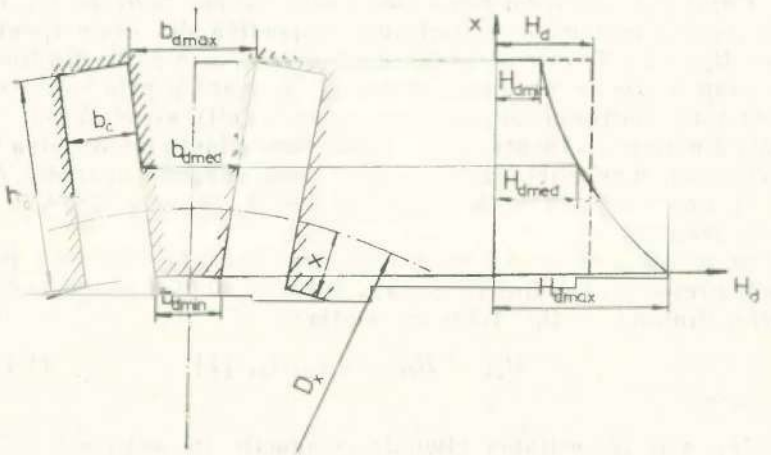


Fig. 1.30 — Variația intensității cîmpului magnetic H în dinții trapezoidali (crestătura are pereții paraleli).

Se calculează, în acest caz, inducţiile aparente în cele trei secţiuni ale dintelui (minimă, medie şi maximă), obţinînd :

$$B'_{d\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}}, \text{ cu } b_{d\min} = t_1 - b_{c1};$$

$$B'_{d\mathrm{med}} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\mathrm{med}}}, \text{ cu } b_{d\mathrm{med}} = \frac{\pi(D + h_{c1})}{Z_1} - b_{c1}; \qquad (1.110)$$

$$B'_{d\min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\max}}, \text{ cu } b_{d\max} = \frac{\pi(D + 2h_{c1})}{Z_1} - b_{c1}.$$

În funcţie de valorile obţinute pentru inducţiile aparente cu relaţiile (1.110), se pot distinge două cazuri :

Cazul 1. Toate valorile sînt mai mici decît 1,8 T

Aceasta înseamnă că porţiunile respective de dinte sînt nesaturate şi tot fluxul unui pas dentar t_1 trece prin dinte, adică inducţia aparentă B'_d şi cea reală B_d sînt egale.

În acest caz, din curba de magnetizare (anexa 2) se determină :

— pentru $B'_{d\max} \rightarrow H_{d\max}$;

— pentru $B'_{d\mathrm{med}} \rightarrow H_{d\mathrm{med}}$;

— pentru $B'_{d\min} \rightarrow H_{d\min}$.

În relaţia (1.109) se introduce valoarea medie a intensităţii cîmpului magnetic obţinută cu relaţia lui Simpson :

$$H_{d1} = \frac{1}{6}\,(H_{d\max} + 4H_{d\mathrm{med}} + H_{d\min}). \qquad (1.111)$$

Cazul 2. O parte din valori (sau toate) sînt mai mari decît 1,8 T

Aceasta înseamnă că porţiunea respectivă din dinte (pentru care $B'_d > 1{,}8$ T) este saturată, ceea ce face ca o parte din liniile de cîmp magnetic ale unui pas dentar să treacă şi prin crestătură (reluctanţa porţiunii saturate creşte foarte mult), astfel că inducţia reală din dinte B_d (pentru care trebuie determinată intensitatea H_d a cîmpului magnetic), este mai mică decît inducţia aparentă B'_d.

În acest caz pentru determinarea lui H_d se poate proceda în două moduri :

a) se calculează, mai întîi, valoarea inducţiei reale din porţiunea respectivă a dintelui (aflată de exemplu la distanţa „x" de vîrful dintelui — fig. 1.30) cu relaţia :

$$B_{dx} = B'_{dx} - \mu_0 k_{dx} H_{dx} \text{ [T]} \qquad (1.112)$$

în care :

H_{dx} este intensitatea cîmpului magnetic în secţiunea „x" a dintelui (luată din curba de magnetizare pentru B'_{dx}), în A/m (1 A/m = 10^2 A/cm) ;

$k_{dx} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dx}}$ — coeficient al dintelui în secţiunea „x", cu :

$b_{dx} = \frac{\pi D_x}{Z_1} - b_c$ — lăţimea dintelui în secţiunea „x" (corespunzătoare diametrului D_x).

De exemplu :

— pentru secţiunea minimă a dintelui (x = 0) :

$$k_{d3} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}};$$

— pentru secţiunea medie a dintelui $\left(x = \frac{h_c}{2}\right)$:

$$k_{d2} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\mathrm{med}}}; \qquad (1.112\ a)$$

— pentru secţiunea maximă a dintelui ($x = h_c$) :

$$k_{d1} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\max}}.$$

Deci k_{dx} depinde de secţiunea „x" în care s-a obţinut cu relaţiile (1.110) $B'_{dx} > 1{,}8$ T.

Pentru fiecare B_{dx} obţinut curelaţia (1.112) se determină din curba de magnetizare H_{dx} corespunzător (maxim, mediu sau minim) ; se determină apoi valoarea medie a intensităţii cîmpului magnetic cu relaţia (1.111) a lui Simpson, care se introduce în relaţia (1.109) de calcul a t.m. ;

b) se folosesc direct curbele de magnetizare trasate pentru diverse valori ale coeficientului k_{dx} (vezi anexa 2). În acest caz intensitatea reală a cîmpului magnetic în secţiunea „x" a dintelui H_{dx}, rezultă direct pentru inducţia aparentă B'_{dx} dată de relaţiile (1.110), după curba corespunzătoare coeficientului respectiv k_{dx}, fără să mai fie necesară aplicarea relaţiei (1.112).

Pentru restul secţiunilor de dinte în care $B'_{dx} < 1{,}8$ T, sau al părţilor de circuit magnetic din acelaşi material (anexa 2) pentru care k_d nu are sens, cum este jugul statorului, se utilizează pentru determinarea intensităţii cîmpului magnetic H curba corespunzătoare lui $k_{dx} = 0$.

De exemplu : (inducţiile s-au calculat cu relaţiile (1.110)) :

— dacă $B'_{d\max} > 1{,}8$ T, pentru k_{d3}, din anexa 2 $\rightarrow H_{d\max}$;

— dacă $B'_{d\mathrm{med}} > 1{,}8$ T, pentru k_{d2}, din anexa 2 $\rightarrow H_{d\mathrm{med}}$;

— dacă $B'_{d\min} \leqslant 1{,}8$ T, pentru $k_d = 0$, din anexa 2 $\rightarrow H_{d\min}$.

Cu relaţia (1.111) se calculează H_{d1}, care se introduce apoi în relaţia (1.109).

OBSERVAȚII. 1. Chiar dacă forma crestăturii este semiînchisă sau semideschisă, se utilizează totuși relația : $b_{d\min} = t_1 - b_c$, **deși s-ar părea că trebuie folosită relația** $b_{d\min} = t_1 - a_s$.

2. Dacă inducția aparentă $B'_{d\,\max} < 2$ **T se poate lucra, în locul valorii medii a intensității cîmpului magnetic dată de relația (1.111) a lui Simpson, cu valoarea lui** H_d, **corespunzătoare, inducției în secțiunea dintelui la 1/3 din „**h_c**", considerată de la baza sa (**$x = h_c/3$, **fig. 1.30). Adică :**

$$B'_{d1/3} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d1/3}}, \text{ cu } b_{d1/3} = \frac{\pi\left(D + \frac{2}{3} h_{c1}\right)}{Z_1} - b_{c1}.$$

Din curba de magnetizare (anexa 2) pentru $B'_{d1/3}$ **și** $k_{d1/3}$ **corespunde** $H_{d1/3}$ **cu care se calculează apoi t.m. (relația 1.109)).**

C. **T.m. a jugului statorului (indusului)**, pentru o pereche de poli :

$$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1} \text{ [A]} \qquad (1.113)$$

în care :

$L_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p}$ [cm] este lungimea medie a liniei de cîmp în jugul statorului ;

H_{j1} — intensitatea cîmpului magnetic în jugul statorului, în A/cm, determinată din anexa 2 pentru valoarea inducției în jug, dată de relația (1.34).

Prin coeficientul ζ_1 se ține seama că inducția în jug, în lungul liniei L_{j1}, nu este constantă ; ea are o valoare maximă (calculată cu relația (1.34)) la mijlocul distanței dintre poli și se micșorează către ambele axe ale polilor. Densitatea liniilor de cîmp în jug este maximă în axa dintre poli și minimă în axele polilor. De asemenea repartiția liniilor de cîmp pe deschiderea pasului polar τ este funcție de gradul de saturație al jugului, adică de valoarea inducției magnetice în jug.

În figura 1.31 sînt indicate valorile lui $\zeta_{1,2}$ în funcție de inducția maximă în jugul statorului (1) sau rotorului (2) (la mașinile în construcție inversă), calculate cu relația (1.34).

D. **Tensiunile magnetice ale polilor sau dinților rotorului**

1. *Mașini cu poli aparenți*

— *T.m. a polului*, pentru o pereche de poli

$$U_{mm} = 2(h_m + h_p) H_m \text{ [A]} \qquad (1.114)$$

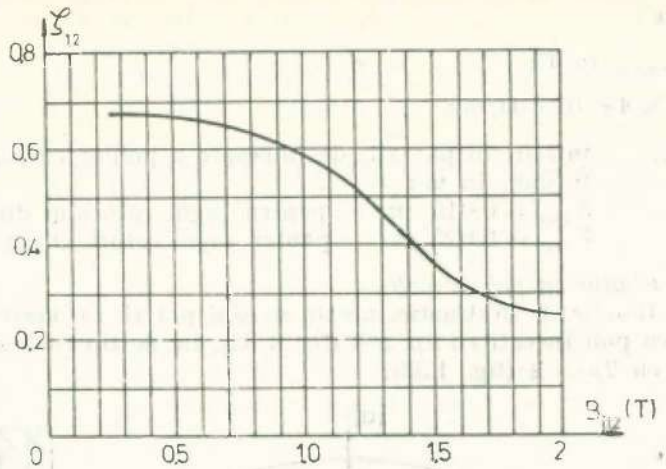


Fig. 1.31 — Coeficientul ζ în funcție de inducția maximă în jug.

în care :

$$H_m = \frac{1}{6}(H_{m\max} + 4H_{m\,med} + H_{m\min}) \text{ [A/cm]}, \qquad (1.114\ a)$$

este intensitatea medie a cîmpului magnetic în corpul polului ;

h_m și h_p se introduc în cm.

Cele trei valori ale inducției magnetice în corpul polului, pentru care rezultă, din anexa 3, intensitățile cîmpului magnetic, se determină cu relațiile (vezi și relațiile (1.46), (1.48) și (1.49 a)) :

$$B_{m\max} = \frac{\sigma\Phi}{k_{Fem} l_m b_m} \text{ [T] ;}$$

$$B_{m\min} = B_{m\max} \frac{(\sigma - 1)\frac{\lambda_p}{\lambda_{sc}} + 1}{\sigma} \text{ [T] ;} \qquad (1.114\ b)$$

$$B_{m\,med} = B_{m\min} + \frac{3}{4}(B_{m\max} - B_{m\min}) \text{ [T]}.$$

— *T.m. a întrefierului de îmbinare* dintre pol și jugul rotorului, pentru o pereche de poli

$$U_{m\delta imb} = 2\frac{B_{m\max}}{\mu_0} \delta_{imb} \text{ [A]} \qquad (1.115)$$

în care :

B_{mmax}, în T ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m ;

δ_{imb} — întrefierul parazit, de îmbinare a polilor cu jugul rotorului, în m :

$\delta_{imb} = 0{,}015$ cm — pentru jugul rotorului din oțel ;

$\delta_{imb} = 0{,}025$ cm — pentru jugul rotorului din fontă.

2. *Mașini cu poli înecați*

În funcție de destinație, aceste mașini pot fi, fie mașini normale cu poli înecați cu $2p \geqslant 4$ (fig. 1.32), fie de tip turbogeneratoare cu $2p = 2$ (fig. 1.33).

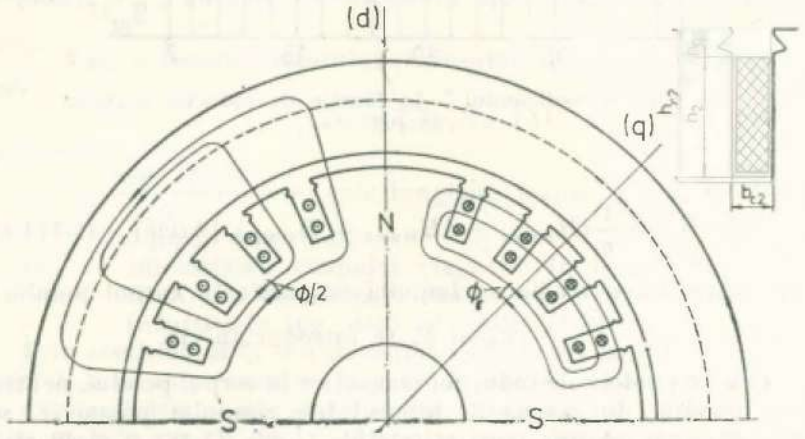


Fig. 1.32 — Mașina sincronă cu poli înecați ($2p \geqslant 4$).

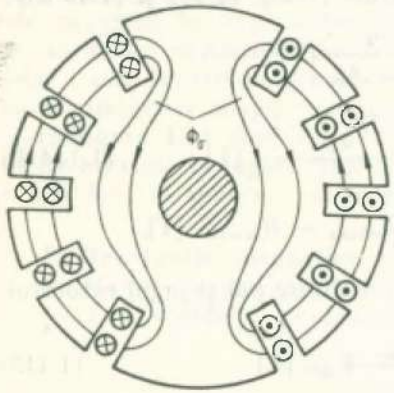


Fig. 1.33 — Rotor cu poli înecați cu $2p=2$ (tip turbogenerator) și spectrul aproximativ al cîmpului de dispersie.

Mașinile normale cu $2p \geqslant 4$ au miezul magnetic rotoric împachetat din tole de tablă silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate rezultate din interioarele tolelor statorului, iar dintele mare este din întregul (fără crestături). Dacă se urmărește însă obținerea unui magnetism remanent sporit, atunci se pot folosi două soluții :

— se ștanțează crestături și în dintele mare (rotoul va avea Z_2' crestături uniform repartizate), care nu se vor bobina ci se vor introduce în aceste crestături bare masive de oțel consolidate prin sudare ;

— se utilizează pentru miezul rotoric tablă de oțel obișnuit cu grosimea de $1 \div 2$ mm ca la polii aparenți. Această soluție este însă neeconomică din punct de vedere al folosirii materialelor. De aceea, cel mai frecvent se întîlnește prima soluție sau soluția cu dintele mare necrestat (evident cu remanență mică).

Mașinile cu $2p = 2$ (turbogeneratoarele) au rotorul fie masiv forjat dintr-o bucată, fie din inele de tablă groasă (circa 100 mm) forjate și presate pe arbore, prelucrarea crestăturilor făcîndu-se direct pe butucul asamblat.

— *T.m. a dinților rotorului*, pentru o pereche de poli

$$U_{mdR} = 2h_{c2}H_{dR} \text{ [A]} \qquad (1.116)$$

în care :

$$H_{dR} = \frac{1}{6}\left(H_{dR\max} + 4H_{dR\mathrm{med}} + H_{dR\min}\right) \text{ [A/cm]}, \qquad (1.116\ a)$$

este intensitatea medie a cîmpului magnetic în dintele mare al rotorului.

Intensitățile cîmpului magnetic în cele trei secțiuni ale dintelui mare (minimă, medie și maximă) se determină din curba de magnetizare a materialului utilizat pentru miezul rotorului (pentru tablă silicioasă — anexa 2, pentru tablă de oțel — anexa 3), în funcție de inducțiile magnetice din secțiunile respective ale dintelui mare al rotorului.

Determinarea inducțiilor magnetice în cele trei secțiuni ale dintelui mare al rotorului, se face în funcție de faptul dacă dintele mare este prevăzut sau nu cu crestături [12]. Din acest punct de vedere se disting două cazuri :

a) *Rotor la care dintele mare nu are crestături sau crestăturile sînt umplute cu bare masive feromagnetice ori sînt închise cu pene*

feromagnetice. Tot în această categorie intră şi cazul cînd în dintele mare sînt prevăzute crestături pentru înfăşurarea de amortizare (fig. 1.16 b), deoarece dimensiunile acestora sînt mult mai mici decît ale crestăturilor bobinate, avînd de asemenea deschiderea b_c a istmului, mică.

Considerînd cazul cel mai frecvent întîlnit, cînd solenaţiile tuturor crestăturilor bobinate sînt egale, rezultă o curbă de repartiţie a inducţiei în întrefier de forma indicată în figura 1.34.

După cum se vede, pentru forma în trepte a cîmpului în întrefier sau trapezoidală, reprezentată cu linie întreruptă, fluxul util pe pol se poate estima prin relaţia

$$\Phi = \frac{\tau + b'_p - t_R}{2} l_i B_\delta \text{ [Wb]}$$

în care (fig. 1.34) :

b'_p este arcul polar al părţii nebobinate a inductorului măsurat între axele crestăturilor care o delimitează la periferia indusului.

De-a lungul arcului b'_p, inducţia în întrefier la suprafaţa indusului este aproximativ constantă şi egală cu valoarea maximă B_δ din axa polului, corespunzător căreia s-au determinat şi celelalte tensiuni magnetice $U_{m\delta}$, U_{md1} şi U_{mj1}.

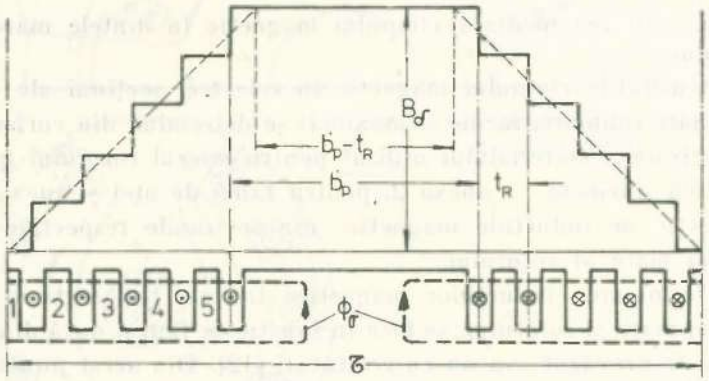


Fig. 1.34 — Curba repartiţiei spaţiale a inducţiei în întrefier, pentru un inductor la care dintele mare nu are crestături sau are crestături (nebobinate) închise cu pene feromagnetice.

Pentru determinarea inducţiilor în cele trei secţiuni ale dintelui mare al rotorului, se au în vedere următoarele considerente :

— fluxul util prin dintele mare este dat de relaţia

$$\Phi_D = b'_p l_i B_\delta \text{ [Wb]} \qquad (1.117)$$

unde (pentru N_D, vezi relaţiile (1.69)) :

$$b'_p = (N_D + 1) t_R \text{ [m]} ; \qquad (1.117\text{ a})$$

— după cum se vede din figura 1.32 şi figura 1.33, fluxul de scăpări rezultant al inductorului nu solicită decît dintele mare, deoarece prin dinţii mici are o direcţie transversală ;

— fluxul de scăpări al inductorului (rotorului) în zona crestăturilor, este uniform repartizat pe înălţimea crestăturii (a dintelui mare), lucru valabil numai pentru scăpările în crestătură. Fluxul de scăpări de la dinte la dinte solicită însă toate secţiunile dintelui mare, deşi el este mult mai mic decît fluxul de scăpări prin crestături.

De aceea, pentru a lucra acoperitor, se consideră că toate secţiunile dintelui mare (minimă, medie şi maximă) sînt solicitate de întregul flux de scăpări al inductorului. Fluxul de scăpări al inductorului (rotorului) [12, vol II]

$$\Phi_\sigma = \lambda_{\sigma e} U_{m\delta dj1} \text{ [Wb]} \qquad (1.117\text{ b})$$

în care permeanţa totală a fluxului de scăpări este

$$\lambda_{\sigma e} = 2\mu_0 \frac{l_{Fe2}}{N_b} (\lambda_{ce} + \lambda_{de}) + 0{,}2\mu_0 l_R \qquad (1.118)$$

unde :

N_b este numărul crestăturilor bobinate pe pol (vezi relaţiile (1.69)) ;

l_{Fe2} — lungimea miezului rotoric, în m ;

λ_{ce} — permeanţa specifică a cîmpului de scăpări în crestătură. Pentru crestătura din figura 1.32

$$\lambda_{ce} = \frac{h_2}{2b_{c2}} + \frac{h_{o2}}{b_{c2}} \qquad (1.118\text{ a})$$

(în cazul altor forme de crestături reprezentate în figura 1.22 şi figura 1.23, se utilizează pentru λ_{ce}, relaţiile cunoscute din literatură — vezi relaţiile (1.86 ..., 1.89) — cu deosebirea că termenul

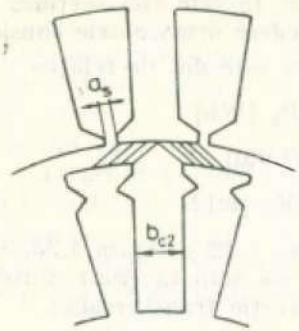


Fig. 1.35 — Cu privire la permeanța scăpărilor de la dinte la dinte.

corespunzător înălțimii active a crestăturii, ocupată de conductoare, are la numitor 2 și nu 3) ;

λ_{de} — permeanța specifică a cîmpului de scăpări de la dinte la dinte :

— pentru rotorul împachetat din tole (vezi și fig. 1.35)

$$\lambda_{de} = \frac{[t_R - 0{,}75(a_s + b_{c2})]^2}{6t_R\delta} ; \qquad (1.118\ b)$$

— pentru rotorul masiv

$$\lambda_{de} = \frac{5\dfrac{\delta}{b_{c2}}}{5 + 4\dfrac{\delta}{b_{c2}}} . \qquad (1.118\ c)$$

Fluxul total care trece numai prin dintele mare al rotorului este dat de relația

$$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma \ [\mathrm{Wb}]. \qquad (1.119)$$

Rezultă astfel inducțiile magnetice în cele trei secțiuni ale dintelui mare al rotorului :

$$B_{dR\max} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min}} \ [\mathrm{T}] ;$$

$$B_{dR\mathrm{med}} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\mathrm{med}}} \ [\mathrm{T}] ; \qquad (1.120)$$

$$B_{dR\min} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dR\max}} \ [\mathrm{T}]$$

în care, lățimile dintelui mare se determină cu relațiile :

$$b_{DR\min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} ;$$

$$b_{DR\mathrm{med}} = \frac{\pi(D_r - h_{c2})}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} ; \qquad (1.120\ a)$$

$$b_{DR\max} = \frac{\pi D_r}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2}$$

unde :

N_D este numărul de crestături nebobinate sau neștanțate pe un pol (vezi relația (1.69)).

Dacă există crestături (nebobinate) și în dintele mare, care nu sînt umplute cu material feromagnetic masiv, sau crestături ale înfășurării de amortizare ori alte orificii pentru ventilație, atunci lățimile dintelui mare în zona respectivă, cu care se calculează inducțiile în dintele mare al rotorului, se vor reduce corespunzător cu aceste crestături sau orificii.

Astfel, de exemplu, în cazul existenței crestăturilor înfășurării de amortizare, înălțimea dintelui mare se împarte în două tronsoane : tronsonul I, cuprinde zona dintelui mare în care nu există crestături, adică de la baza crestăturii înfășurării de excitație pînă la baza crestăturii înfășurării de amortizare ; tronsonul II, cuprinde zona dintelui mare în care există crestăturile înfășurării de amortizare.

T.m. a dinților rotorului se determină, în acest caz, cu relația (2.232), de la exemplul de calcul, adică

$$U_{mdR} = U_{mdR\,I} + U_{mdR\,II}.$$

Pentru cazul cînd *crestăturile înfășurării de amortizare sînt dreptunghiulare*, modul de lucru este redat în exemplul de calcul, prezentat în paragraful 2.26.1 (vezi relațiile (2.231)÷(2.238)).

Pentru cazul cînd *crestăturile înfășurării de amortizare sînt rotunde* (cu diametrul d_a și înălțimea istmului h_0), atunci t.m. a tronsonului I se determină identic ca în cazul precedent al crestăturilor înfășurării de amortizare de formă dreptunghiulară, în care

$$h_I = h_{c2} - (d_a + h_0) \ [\mathrm{cm}].$$

T.m. a tronsonului II (din zona crestăturilor rotunde), se determină tot cu o relație similară cu relația (2.237), adică

$$U_{mdR\,II} = 2h_{II}H_{dR\,II}$$

însă în care, valorile mărimilor (din această relație) se determină astfel (vezi și vol. II pag. 70) :

$$h_{II} = 0{,}9d_a \text{ [cm]};$$

H_{dRII} se ia din curba de magnetizare a tablei folosite la rotor, pentru inducția magnetică calculată cu relația

$$B_{dRII} = \frac{\Phi_{DI}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRII}} \text{ [T]} \qquad (1.120 \text{ b})$$

unde, lățimea echivalentă a dintelui mare, din zona crestăturilor rotunde ale înfășurării de amortizare este :

$$b_{dRII} = \frac{\pi\left(D_r - 2h_0 - \frac{2}{3} d_a\right)}{Z_2'} (N_D + 1) - b_{c2} - 0{,}94 n_a d_a \text{ [m]}. \qquad (1.120 \text{ c})$$

Dacă în crestăturile nebobinate ale dintelui mare s-au introdus bare masive feromagnetice, atunci situația este similară cu cazul cînd dintele mare n-ar fi crestat.

b) *Rotor la care dintele mare are crestături nebobinate deschise*

În acest caz (fig. 1.36), fluxul de scăpări solicită numai dinții care mărginesc arcul polar b_p'. Prin aceasta, inducția în întrefier deasupra acestor dinți devine mai mică decît în restul părții nebobinate a inductorului (rotorului) care corespunde arcului b_p'.

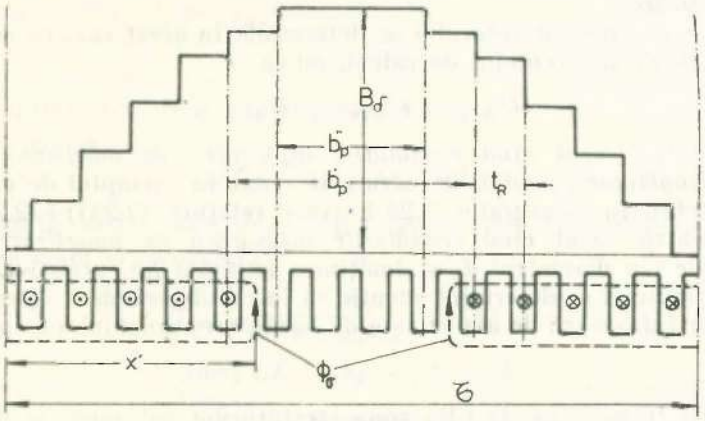


Fig. 1.36 — Curba repartiției spațiale a inducției în întrefier, pentru un inductor cu dintele mare prevăzut cu crestături nebobinate deschise.

Se poate astfel, ca printr-o dimensionare potrivită a secțiunii acestor dinți marginali, să se obțină o curbă a cîmpului în întrefier cît mai apropiată de sinusoidă (fig. 1.36).

După cum se vede, pentru valoarea maximă a inducției din întrefier B_δ (din axa polului), fluxul util pe pol, se poate estima ca și în cazul mărimilor sinusoidale cu relația

$$\Phi \approx \frac{2}{\pi} \tau l_i B_\delta \text{ [Wb]}. \qquad (1.121)$$

Tensiunea magnetică din întrefier, se determină, pentru această inducție, cu coeficientul lui Carter referitor la domeniul arcului b_p''. În acest domeniu al rotorului nu intervine fluxul de scăpări, astfel că, determinarea tensiunii magnetice a dinților rotorului (pentru acest domeniu) se face cu fluxul

$$\Phi_D' = b_p'' l_i B_\delta \text{ [Wb]} \qquad (1.121 \text{ a})$$

unde :

$$b_p'' = (N_D - 1) t_R \text{ [m]},$$

iar a tensiunii magnetice din jugul rotorului, cu fluxul total

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma.$$

Rezultă astfel că t.m. a dinților rotorului se determină tot cu relația (1.116), în care, intensitatea medie a cîmpului magnetic este dată de relația (1.116 a).

Intensitățile cîmpului magnetic în cele trei secțiuni ale dinților din domeniul arcului b_p'', se determină pentru inducțiile aparente din aceste secțiuni date de relațiile :

$$B'_{dR\max} = \frac{\Phi_D'}{S_{dR\min}} \text{ [T]};$$

$$B'_{dR\text{med}} = \frac{\Phi_D'}{S_{dR\text{med}}} \text{ [T]}; \qquad (1.122)$$

$$B'_{dR\min} = \frac{\Phi_D'}{S_{dR\max}} \text{ [T]}$$

în care, secțiunile dinților din domeniul arcului b_p'' se calculează cu relațiile :

$$S_{dR\min} = k_{Fe2} l_{Fe2} (t_{R\min} - b_{c2})(N_D - 1) \text{ [m}^2\text{]};$$

$$S_{dR\text{med}} = k_{Fe2} l_{Fe2} (t_{R\text{med}} - b_{c2})(N_D - 1) \text{ [m}^2\text{]}; \qquad (1.122 \text{ a})$$

$$S_{dR\max} = k_{Fe2} l_{Fe2} (t_R - b_{c2})(N_D - 1) \text{ [m}^2\text{]}$$

unde, pașii dentari ai rotorului în cele trei secțiuni sînt:

$$t_{R\min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z_2'} \text{ [m]};$$

$$t_{R\text{med}} = \frac{\pi(D_r - h_{c2})}{Z_2'} \text{ [m]}; \qquad (1.122\ b)$$

$$t_R = \frac{\pi D_r}{Z_2'} \text{ [m]}.$$

Dacă inducțiile aparente date de relațiile (1.122) $B'_{dRx} < 1{,}8$ T (x = max, med, min), atunci intensitatea corespunzătoare a cîmpului magnetic H_{dRx} se alege din curbele de magnetizare ale materialului miezului rotor pentru $k_{dRx} = 0$.

Dacă $B'_{dRx} > 1{,}8$ T, atunci H_{dRx} se alege și în funcție de coeficientul respectiv al dintelui rotor din secțiunea corespunzătoare, determinat similar ca cel al dintelui stator (vezi relațiile (1.112 a))

$$k_{dRx} = \frac{b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRx}} \qquad (1.122\ c)$$

unde lățimea dintelui mic (nebobinat), din secțiunea „x" este

$$b_{dRx} = t_{Rx} - b_{c2},$$

t_{Rx}, fiind dat de relațiile (1.122 b).

În cazul cînd curbele de magnetizare ale materialului miezului rotoric nu sînt trasate și pentru diferiți coeficienți $k_{dRx} \neq 0$, atunci (pentru $B'_{dRx} > 1{,}8$ T) se calculează mai întîi inducția reală în secțiunea „x" unde este mai mare ca 1,8 T cu relația (1.112), apoi pentru valoarea reală obținută B_{dRx} rezultă din curbă (sau tabel) intensitatea respectivă a cîmpului magnetic H_{dRx} (a se vedea și punctul B al paragrafului).

În cele de mai sus, s-a considerat că în dintele mare există crestături nebobinate și deschise, identice cu cele bobinate. Dacă însă dimensiunile crestăturilor nebobinate din dintele mare sînt diferite de cele bobinate, atunci cele menționate se vor referi la dimensiunile crestăturilor existente, în realitate, în dintele mare.

OBSERVAȚIE. În cele două posibilități de construcție a inductorului (rotorului) cu poli înecați tratate, s-au adoptat curbele simplificate de repartiție în spațiu, pe deschiderea pasului polar τ, a cîmpului magnetic din întrefier, curbe apropiate de situația reală

Se pot însă determina exact aceste curbe, în ambele cazuri, ținînd cont de fluxurile care trec prin fiecare dinte atît al părții bobinate cît și al părții nebobinate inclusiv prin dinții care conduc fluxul de scăpări din cazul *b*. În acest scop a se vedea [12] vol. II, pag. 115—117. Abaterile de la curba exactă la curba simplificată fiind însă mici s-a considerat că metoda prezentată este corespunzătoare necesitînd și un volum de calcule mai redus.

3. *Mașini cu rotorul în variantă combinată*

După cum s-a văzut (fig. 1.18 a), piesa polară este amplasată deasupra dintelui mare și de aceea în acesta nu-și are rostul existența unor crestături (nebobinate).

Deoarece, în afara suprafeței de îmbinare dintre piesa polară și dintele mare, întrefierul este destul de mare, se consideră că întregul flux al polului trece numai prin dintele mare; deci dintele mare este similar cu corpul polului de la mașinile cu poli aparenți.

— *T.m. a dintelui mare al rotorului*, pentru o pereche de poli se calculează similar ca la mașinile cu poli înecați

$$U_{mdR} = 2h_{c2} H_{dR} \text{ [A]} \qquad (1.123)$$

în care:

$$H_{dR} = \frac{1}{6}(H_{dR\max} + 4H_{dR\text{med}} + H_{dR\min}) \text{ [A/cm]}, \qquad (1.123\ a)$$

este intensitatea medie a cîmpului magnetic în dintele mare al rotorului calculată cu cele trei intensități ale cîmpului magnetic, corespunzătoare celor trei inducții din dintele mare.

Valorile inducțiilor din dintele mare (fig. 1.18 a), maximă (în secțiunea 1—1'), medie (în secțiunea 2—2') și minimă (în secțiunea 3—3'), se determină conform următoarelor ipoteze, foarte apropiate de situația reală:

a) se consideră că fluxul de scăpări din zona crestăturilor rotorice $\Phi_{\sigma c}$, este uniform repartizat pe înălțimea crestăturii;

b) pentru valori ale inducției mai mici decît 1,8 T se consideră că tot fluxul polului, din acea porțiune, trece numai prin dintele mare;

c) pentru inducții mai mari decît 1,8 T se consideră că o parte din fluxul polului, trece și prin crestăturile și dinții mici, vecini dintelui mare, însă numai pe deschiderea piesei polare $b_p = \alpha_p \tau$, deoarece întrefierul de sub piesa polară este mult mai mic decît δ_{transv} din axa transversală.

Pe baza primelor două ipoteze, rezultă că fluxurile în cele trei secțiuni, în care se calculează inducțiile din dintele mare sînt :

— pentru secțiunea minimă (1—1')

$$\Phi_{max} = \Phi + \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} \text{ [Wb]} ;$$

— pentru secțiunea medie (2—2')

$$\Phi_{med} = \Phi + \frac{1}{2}\Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} \text{ [Wb]} ;$$

— pentru secțiunea maximă (3—3')

$$\Phi_{min} = \Phi + \Phi_{\sigma p} \text{ [Wb]}.$$

Fluxul de scăpări al inductorului, în conformitate cu [3], [5] și [12], se calculează ținînd cont că sub aspect teoretic și constructiv, noul tip de rotor conține elemente ale fiecărei variante clasice. Rezultă astfel că, fluxul total de scăpări Φ_σ are două componente :

— *în zona crestăturilor*, care se calculează similar ca la varianta cu poli înecați, utilizînd relația

$$\Phi_{\sigma c} = \lambda_{\sigma c} U_{m\delta dj1\delta imb} \text{ [Wb]} \qquad (1.124)$$

în care :

$$\lambda_{\sigma c} = 2\mu_0 \frac{l_{Fe1}}{N_s} \lambda_{ce} + 0{,}2\mu_0 l_D. \qquad (1.125)$$

este permeanța totală a fluxului de scăpări în zona crestăturilor, cu semnificația termenilor ca în relația (1.118) și figura 1.18 a (pentru crestătura rotorului) ;

$$U_{m\delta dj1\delta imb} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} + U_{m\delta imb} \text{ [A]}$$

este tensiunea magnetică (pe partea statorului), de la extremitățile circuitului magnetic, pentru zona crestăturilor (pînă la îmbinarea pieselor polare cu dintele mare), pe o pereche de poli.

OBSERVAȚIE. Deoarece întrefierul transversal δ_{trans}, este mult mai mare decît întrefierul δ al mașinii, în relația (1.125) nu se mai consideră permeanța scăpărilor de la dinte la dinte, ca în relația (1.118) ;

— *în zona pieselor polare*, care se calculează similar ca la varianta cu poli aparenți cu relația :

$$\Phi_{\sigma p} = \lambda_{\sigma p} U_{m\delta dj1} \text{ [Wb]} \qquad (1.126)$$

în care (vezi relațiile (1.49 a) și fig. 1.16 a)

$$\lambda_{\sigma p} = 2\mu_0 l_p \left[\frac{h'_p}{c_p} + \frac{2h_{pm}}{\pi l_p} \ln\left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_p}{c_p}\right)\right], \qquad (1.127)$$

este permeanța totală a fluxului de scăpări în zona pieselor polare, unde :

$$h_{pm} = \frac{^{\circ}h_p + h'_p}{3}$$

este înălțimea echivalentă a piesei polare, în m ;

l_p — lungimea piesei polare, în m.

Celelalte mărimi cu semnificațiile din figura 1.18 a se introduc în m (pentru c_p, vezi și relația (1.49 b)) ;

$$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} \text{ [A]}$$

este tensiunea magnetică a statorului, pe o pereche de poli (de la extremitățile dinspre întrefier ale circuitului magnetic pentru zona pieselor polare).

Rezultă astfel inducțiile în cele trei secțiuni ale dintelui mare :

$$B'_{dRmax} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmin}} \text{ [T]} ;$$

$$B'_{dRmed} = \frac{\Phi + \frac{1}{2}\Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmed}} \text{ [T]} ; \qquad (1.128)$$

$$B'_{dRmin} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmax}} \text{ [T]}$$

în care :

$$b_{DRmin} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} ;$$

$$b_{DRmed} = \frac{\pi(D_r - h_{c2})}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} ; \qquad (1.128\ a)$$

$$b_{DRmax} = \frac{\pi D_r}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2}$$

sînt lățimile corespunzătoare ale dintelui mare, în m.

Ipoteza 3-a (pentru $B'_{dRx} > 1{,}8$ T) se ia în considerație prin folosirea, la determinarea din curba de magnetizare a intensității cîmpului magnetic respectiv H_{dRx}, a coeficientului de dinte k_{dRx}, calculat pentru secțiunea aflată la distanța „x" de fundul crestă-

turii rotorului, însă numai pe deschiderea b_p a piesei polare, cu relația

$$k_{dRx} = \frac{S_{crx}}{S_{FedRx}} = \frac{\left(\alpha_p \frac{Z_2'}{2p} - N_D\right) b_{c2} l_i}{k_{Fe2}\left[\alpha_p \frac{Z_2'}{2p}(t_{Rx} - b_{c2}) + N_D b_{c2}\right] l_{Fe2}}. \quad (1.129)$$

Astfel :

— pentru $x = 0 \Rightarrow t_{R\min} \Rightarrow k_{dR\max}$, asociat lui $B'_{dR\max}$;

— pentru $x = h_{c2}/2 \Rightarrow t_{R\mathrm{med}} \Rightarrow k_{dR\mathrm{med}}$, asociat lui $B'_{dR\mathrm{med}}$;

— pentru $x = h_{c2} \Rightarrow t_{R\max} \Rightarrow k_{dR\min}$, asociat lui $B_{dR\min}$.

— *T.m. a întrefierului de îmbinare*, dintre piesa polară și dintele mare, pentru o pereche de poli

$$U_{m\delta imb} = 2 \frac{B_{dR\min}}{\mu_0} \delta_{imb} \text{ [A]} \quad (1.130)$$

în care întrefierul de îmbinare

$$\delta_{imb} = 0{,}015 \text{ cm}.$$

E. **T.m. a jugului rotorului (inductorului)**, pentru o pereche de poli

$$U_{mj2} = L_{j2} H_{j2} \text{ [A]} \quad (1.131)$$

în care :

H_{j2} este intensitatea cîmpului magnetic în jugul rotorului (inductorului) în A/cm, care se determină din curba de magnetizare, pentru inducția în jugul rotorului B_{j2} și materialul jugului rotor.

Valoarea exactă a inducției în jugul rotorului se determină din relațiile (1.54) sau (1.55), însă pentru h_{j2} recalculat (cu D_{ir} definitiv) și cu fluxul de scăpări exact calculat mai sus.

Astfel pentru mașinile cu poli aparenți, varianta combinată și cu poli înecați, însă cu $2p \geqslant 4$:

— pentru jugul rotorului împachetat din tole :

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2k_{Fe2} l_{Fe2} h_{j2}} \text{ [T]} ; \quad (1.132)$$

OBSERVAȚIE. La mașinile cu rotorul în variantă combinată

$$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} \text{ [Wb]}.$$

— pentru jugul rotorului masiv :

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2 l_{Fe2} h_{j2}} \text{ [T]} \quad (1.132 \text{ a})$$

în care h_{j2} are valoarea recalculată după rotunjirea diametrului interior rotor D_{ir}. Pentru arbore butuc

$$h_{j2} \approx D_{butuc}/2.$$

Pentru mașinile cu $2p = 2$ (turbogeneratoare), conform [11]

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l_{Fe2}(D_r - 2h_{c2})} \text{ [T]}. \quad (1.133)$$

Lungimea medie a liniei de cîmp în jugul rotorului :

— pentru mașinile cu poli aparenți, variantă combinată și cu poli înecați cu $2p \geqslant 4$

$$L_{j2} \approx \frac{\pi(D_{ir} + h_{j2})}{2p} \text{ [cm]} ; \quad (1.134)$$

— pentru mașinile cu $2p = 2$ (cu poli înecați)

$$L_{j2} \approx D_r - 2h_{c2} \text{ [cm]} ; \quad (1.134 \text{ a})$$

— pentru arborele butuc se ia

$$L_{j2} \approx \frac{\pi D_{butuc}}{2 \cdot 2p} \text{ [cm]}. \quad (1.134 \text{ b})$$

1.9.2. CONSTRUCȚIA CARACTERISTICILOR MAGNETICE ȘI DETERMINAREA SOLENAȚIEI DE EXCITAȚIE NOMINALĂ

A. Caracteristicile magnetice ale mașinii sincrone

La mașinile sincrone se disting două tipuri de caracteristici magnetice cu utilitate practică și anume :

a) Caracteristici magnetice la funcționarea în gol :

$$\left.\begin{aligned} &\Phi = f(\Sigma U_{mi}) \text{ sau} \\ &E = f(I_e). \end{aligned}\right\} \quad (1.135)$$

b) Caracteristici magnetice parțiale :

$$\left.\begin{aligned} &\Phi = f(U_{m\delta dj1}) \text{ — a statorului ;} \\ &\Phi_m = f(U_{mR}) \text{ — a rotorului ;} \\ &\Phi_\sigma = f(U_{m\delta dj1}) \text{ — a fluxului de scăpări dintre poli} \end{aligned}\right\} \quad (1.135 \text{ a})$$

în care :

$$U_{m\delta d j1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} \text{ [A]};$$

$$U_{mR} = U_{mm} + U_{m\delta im b} + U_{mj2} \text{ [A]}.$$

Pentru construcția grafică a acestor caracteristici se calculează tensiunile magnetice corespunzătoare valorilor fluxului Φ, determinate pentru diferite valori ale t.e.m. ca de exemplu :

$0{,}55U_{1N}$; $0{,}85U_{1N}$; U_{1N} ; $E_{1N} = k_E U_{1N}$; $1{,}23U_{1N}$; $1{,}3U_{1N}$.

Rezultatele calculelor se trec sub formă de tabel (tabelul 1.9) cu ajutorul căruia se construiesc caracteristicile magnetice.

Caracteristicile magnetice servesc la determinarea solenației de excitație la sarcină nominală a mașinii sincrone, care interesează cel mai mult.

B. **Solenația de excitație la sarcină nominală**

Pentru determinarea solenației de excitație la sarcină nominală, se utilizează două metode :

1. Metoda caracteristicilor magnetice parțiale, folosită la mașinile cu poli aparenți și varianta combinată.
2. Metoda diagramei Potier, folosită la mașinile sincrone cu poli înecați.

1. *Metoda caracteristicilor magnetice parțiale*

Metoda se aplică la mașinile sincrone cu poli aparenți și cu rotorul în variantă combinată, la care nesimetriile magnetice după cele două axe, longitudinală (d) și transversală (q), sînt mai pronunțate.

După cum se știe, solenația de magnetizare la funcționarea în sarcină a mașinii sincrone are două componente : una corespunzătoare t.m.m. a circuitului magnetic și alta corespunzătoare efectului demagnetizant al reacției indusului (considerînd că mașinile funcționează în regimurile normale adică generatorul inductiv, iar motorul capacitiv).

Prima componentă (fig. 1.38) cuprinde tensiunile magnetice ale indusului (statorului) $U_{m\delta dj1}$, corespunzătoare fluxului rezultant al mașinii după axa longitudinală (pentru t.e.m. rezultantă după axa longitudinală E_{1d}) și tensiunile magnetice ale inductorului (rotorului) U_{mR}, corespunzătoare fluxului total al inductorului (fluxul rezultant + fluxul de scăpări). La rîndul său, fluxul de scăpări depinde de t.m. dintre marginile pieselor polare care la funcționarea în sarcină este mult mai mare decît la funcționarea în gol, deoarece tensiunii magnetice de la funcționarea în gol i se

TABELUL 1.9

Caracteristicile magnetice ale mașinii cu poli aparenți

Relația / $\underset{\sim}{E} = \frac{E}{U_{1N}}$ (u.r.)	u.r.	0,55	0,85	1($\underset{\sim}{U}_{1N}$)	k_E($\underset{\sim}{E}_N$)	1,23	1,3
	V						
1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi = \frac{E}{4k_E f_1 w k_w}$	Wb			Φ_{0N}			
$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i}$	T						
$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_c \delta$	A						
$B'_{dmax} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmin}}$	T						
$B'_{dmed} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmed}}$	T						
$B'_{dmin} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmax}}$	T						
$k_{d1} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmax}}$;	$k_{d2} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmed}}$;			$k_{d3} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{dmin}}$			
H_{dmax}	A/cm						
H_{dmed}	A/cm						
H_{dmin}	A/cm						
$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{dmax} + 4H_{dmed} + H_{dmin})$	A/cm						
$U_{md1} = 2h_{c1} H_{d1}$	A						
$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe} l_{Fe} h_{j1}}$	T						
H_{j1}	A/cm						
$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1}$	A						

Tabelul 1.9. (continuare)

	1	2	3	4	5	6	7	8
	$U_{m\delta df1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mf1}$	A						
A	$\Phi_\sigma = \lambda_{sc} U_{m\delta df1}$	Wb						
	$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$ $(\sigma = \Phi_m/\Phi)$	Wb						
	$B_{m\max} = \dfrac{\Phi_m}{k_{Fem} b_m l_m}$	T						
	$B_{m\min} = \dfrac{(\sigma-1)\dfrac{\lambda_p}{\lambda_{sc}} + 1}{\sigma} B_{m\max}$	T						
	$B_{m\med} = B_{m\min} + \frac{3}{4}(B_{m\max} - B_{m\min})$	T						
	$H_{m\max}$	A/cm						
	$H_{m\min}$	A/cm						
	$H_{m\med}$	A/cm						
	$H_m = \dfrac{1}{6}(H_{m\max} + 4H_{m\med} + H_{m\min})$	A/cm						
	$U_{mm} = 2(h_m + h_p)H_m$	A						
A'	$U_{m\delta imb} = \dfrac{2}{\mu_0} B_{m\max} \delta_{imb}$	A						
	$B_{f2} = \dfrac{\Phi_m}{2k_{Fem} l_{f2} h_{f2}}$	T						
	H_{f2}	A/cm						
	$U_{mf2} = L_{f2} H_{f2}$	A						
	$*U_{mR} = U_{mm} + U_{m\delta imb} + U_{mf2}$	A						
	$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta df1} + U_{mR}$	A			$U_{m\delta N}$			
	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{\delta N}$	u.r.						
	$\underset{\sim}{\Phi}_m = \Phi_m/\Phi_{\delta N}$	u.r.						
	$\underset{\sim}{\Phi}_\sigma = \Phi_\sigma/\Phi_{\delta N}$	u.r.						
	$\Sigma \underset{\sim}{U}_{mi} = \Sigma U_{mi}/U_{m\delta N}$	u.r.						
	$\underset{\sim}{U}_{m\delta df1} = U_{m\delta df1}/U_{m\delta N}$	u.r.						
	$\underset{\sim}{U}_{mR} = U_{mR}/U_{m\delta N}$	u.r.						

* Pentru mașinile cu poli înecați și varianta combinată $U_{mR} = U_{mdR} + U_{mf2}$.

OBSERVAȚIE: Pentru celelalte tipuri de mașini (poli înecați sau variantă combinată) tabelul este asemănător, diferind doar liniile cuprinse între săgețile A–A'. Pentru aceste tipuri porțiunile de tabel A–A' sînt date de tabelul 1.9 *a* (poli înecați) și 1.9 b (varianta combinată).

TABELUL 1.9 a (pentru mașini cu poli înecați)

VARIANTA a (dințele mare fără crestături deschise)

1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_D = b'_p l_i B\delta$	Wb						
$\Phi_\sigma = \lambda_{\sigma t} U_{m\delta df1}$	Wb						
$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma$	Wb						
$B_{dRmax} = \dfrac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmin}}$	T						
$B_{dRmed} = \dfrac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmed}}$	T						
$B_{dRmin} = \dfrac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DRmax}}$	T						
H_{dRmax}	A/cm						
H_{dRmed}	A/cm						
H_{dRmin}	A/cm						
$H_{dR} = \dfrac{1}{6}(H_{dRmax} + 4H_{dRmed} + H_{dRmin})$	A/cm						
$U_{mdR} = 2h_{c2} H_{dR}$	A						

VARIANTA b (dințele mare cu crestături nebobinate deschise)

1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi'_D = b''_p l_i B\delta$	Wb						
$B'_{dRmax} = \dfrac{\Phi'_D}{S_{dRmin}}$	T						
$B'_{dRmed} = \dfrac{\Phi'_D}{S_{dRmed}}$	T						
$B'_{dRmin} = \dfrac{\Phi'_D}{S_{dRmax}}$	T						

$k_{dRmax} = \dfrac{b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRmin}}$; $k_{dRmed} = \dfrac{b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRmed}}$; $k_{dRmin} = \dfrac{b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRmax}}$

VARIANTA b (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8
H_{dRmax}	A/cm						
H_{dRmed}	A/cm						
H_{dRmin}	A/cm						
$H_{dR} = \frac{1}{6}(H_{dRmax} + 4H_{dRmed} + H_{dRmin})$	A/cm						
$U_{mdR} = 2h_{c2}H_{dR}$	A						

TABELUL 1.9 b (pentru mașini cu rotorul în variantă combinată)

1	2	3	4	5	6	7	8
$\Phi_{\sigma p} = \lambda_{\sigma p} U_{m\delta dj1}$	Wb						
$B_{dRmin} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRmax}}$	T						
$U_{m\delta 1mb} = \frac{2}{\mu_0} B_{dRmin} \delta_{1mb}$	A						
$U_{m\delta dj1\delta 1mb} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} + U_{m\delta 1mb}$	A						
$\Phi_{\sigma c} = \lambda_{\sigma c} U_{m\delta dj1\delta 1mb}$	Wb						
$\Phi_{\sigma} = \Phi_{\sigma p} + \Phi_{\sigma c}$	Wb						
$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma p} + \Phi_{\sigma c}\left(\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi}\right)$	Wb						
$B_{dRmed} = \frac{\Phi + \frac{1}{2}\Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe1} l_{Fe2} b_{dRmed}}$	T						

TABELUL 1.9. b (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{dRmax} = \frac{\Phi_m}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dRmin}}$	T						
$k_{dRmax} = \frac{(\alpha_p Z_2'/2p - N_D) b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2}[\alpha_p Z_2'/2p(t_{Rmin} - b_{c2}) + N_D b_{c2}]}$;							
$k_{dRmed} = \frac{(\alpha_p Z_2'/2p - N_D) b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2}[\alpha_p Z_2'/2p(t_{Rmed} - b_{c2}) + N_D b_{c2}]}$;							
$k_{dRmin} = \frac{(\alpha_p Z_2' 2p - N_D) b_{c2} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2}[\alpha_p Z_2'/2p(t_{Rmax} - b_{c2}) + N_D b_{c2}]}$.							
H_{dRmin}	A/cm						
H_{dRmed}	A/cm						
H_{dRmax}	A/cm						
$H_{dR} = \frac{1}{6}(H_{dRmax} + 4H_{dRmed} + H_{dRmin})$	A/cm						
$U_{mdR} = 2h_{c2}H_{dR}$	A						

mai adaugă, la sarcină, și solenația de reacție a indusului, numită, conform [12] vol. II, solenația „eficientă" de reacție a indusului. Din această cauză fluxul de scăpări Φ_σ la funcționarea în sarcină este mult mai mare decît cel de la funcționarea în gol.

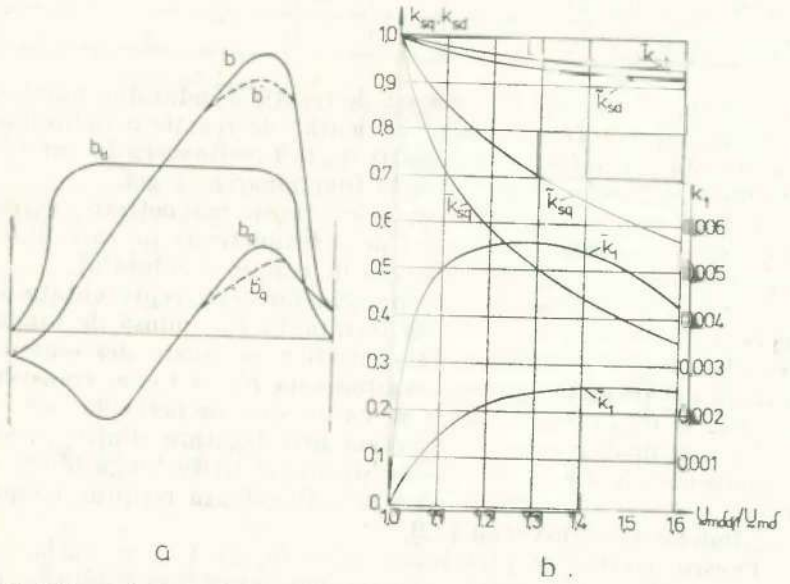
A doua componentă cuprinde solenația de magnetizare, corespunzătoare compensării efectului de demagnetizare pe care îl are asupra mașinii, în sarcină, solenația de reacție a indusului.

După cum se vede din diagramele fazoriale reprezentate în figura 1.28 și figura 1.38, t.e.m. rezultantă E_1, indusă de fundamentala cîmpului rezultant din întrefier, se poate descompune în două componente: t.e.m. longitudinală E_{1d} și t.e.m. transversală $E_{1q} = E_{aq}$, defazate între ele cu un sfert de perioadă.

În continuare, se vor determina atît legătura dintre aceste componente ale t.e.m. rezultante și cîmpul fictiv longitudinal și transversal, cît și modul în care se influențează reciproc cîmpul longitudinal și transversal [12].

Pentru aceasta se presupune că în figura 1.37 a, curba b_d, trasată subțire, reprezintă inducția magnetică longitudinală pe care ar produce-o solenația longitudinală totală, egală cu suma dintre solenația inductorului și cea longitudinală a indusului,

dacă aceasta ar exista singură. Fie b_q, curba inducției magnetice transversale, trasată tot subțire, în cazul cînd solenația transversală, egală cu solenația transversală a înfășurării indusului, ar acționa singură. Dacă permeabilitatea fierului ar fi independentă de inducție, am obține prin superpoziție curba inducției magnetice b, trasată cu linie groasă în figura 1.37 a, a cărei fundamentală induce t.e.m. E_1. În acest caz, cele două componente ale fundamentalei, care induc t.e.m. longitudinală E_{1d} și t.e.m. transversală E_{1q}, sînt egale cu fundamentala inducției longitudinale b_d, respectiv a celei transversale b_q. Datorită însă scăderii permeabilității la creșterea inducției în fierul indusului (din cauza saturației), în general curba rezultantă a cîmpului este aplatisată în regiunile de inducție mare, astfel că în realitate se stabilește o curbă b' a inducției. Se poate imagina că această curbă provine din suprapoziția curbei inițiale b_d a inducției longitudinale cu cea nesimetrică b'_q, trasată cu linie întreruptă. Fundamentala acestei curbe b'_q nu numai că este mai mică decît a celei inițiale b_q, dar este și defazată față de fundamentala acesteia. Acest defazaj are ca urmare nu



a b.

Fig. 1.37 — Influența reciprocă a cîmpului longitudinal și transversal al indusului (a) și valorile coeficienților de evaluare a acestei influențe, în funcție de raportul de saturație magnetică (b).

numai o scădere suplimentară a fundamentalei inducției transversale, ci și o scădere a fundamentalei inducției longitudinale. Se vede deci că cele două cîmpuri ale inducțiilor magnetice, longitudinal și transversal, se slăbesc reciproc, dacă permeabilitatea fierului este dependentă de inducție, și că cele două componente ale fundamentalei cîmpului rezultant corespunzător inducției b', care induc t.e.m. longitudinală E_{1d} și cea transversală E_{1q}, sînt egale cu fundamentalele inducției longitudinale și transversale, numai atunci cînd permeabilitatea fierului este independentă de inducție, adică atunci cînd nu se ia în considerație saturația magnetică.

Influența reciprocă a cîmpului longitudinal și transversal va depinde deci de gradul de saturație a fierului, care este condiționat în principal de raportul $U_{m\delta d1}/U_{m\delta}$, corespunzător t.e.m. E_1 din caracteristica de funcționare în gol. În schimb, influența reciprocă a celor două componente de cîmp nu depinde de tensiunea magnetică U_{mR} în inductor, dacă suprafața piesei polare este o suprafață echipotențială, ceea ce are loc în mai toate cazurile din practică.

Așadar, în funcție de unghiul ψ, apare o solenație transversală a indusului și astfel, la o saturație ceva mai pronunțată a circuitului magnetic, cîmpul longitudinal rezultant este slăbit prin cîmpul transversal.

Rezultă deci că această influență de slăbire trebuie luată în considerare printr-o mărire corespunzătoare a solenației, solenație care se ia, de regulă, numai după axa longitudinală, dacă nu se consideră saturația magnetică (analog ca la mașina de c.c.).

Acest termen suplimentar este cu atît mai mare cu cît este mai mare solenația transversală $F_{aq} = F_a \cos \psi$ și cu cît este mai mic raportul dintre întrefierul δ și pasul polar τ. Dacă lățimea întrefierului δ este constantă de-a lungul piesei polare b_p, acest termen suplimentar mai este practic proporțional cu raportul b_p/τ, pe cînd în cazul unor piese polare dimensionate pentru o curbă sinusoidală a cîmpului în întrefier la funcționarea în gol ($\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$), această proporționalitate cu b_p/τ practic dispare.

În consecință solenația „eficientă" de reacție a indusului care ia în considerare efectul de demagnetizare al ambelor componente (longitudinală și transversală) se determină cu relațiile [12]:

— pentru întrefier constant ($\delta_M/\delta = 1$)

$$\underset{\sim}{F'_{ad\,q}} = \tilde{k}_{sd}k_{ad}\underset{\sim}{F_a}\sin\psi + \tilde{k}_1\frac{\dfrac{\underset{\sim}{F_a}\cos\psi}{\dfrac{\delta}{\tau}}}{\dfrac{b_p}{\tau}} =$$

$$= \tilde{k}_{sd}k_{ad}\underset{\sim}{F_a}\sin\psi + \tilde{k}_1\frac{b_p}{\delta}\underset{\sim}{F_a}\cos\psi \text{ [u.r.]}; \qquad (1.136)$$

— pentru întrefier variabil ($\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$)

$$\underset{\sim}{F'_{ad\,q}} = \tilde{k}_{sd}k_{ad}\underset{\sim}{F_a}\sin\psi + \tilde{k}_1\frac{\underset{\sim}{F_a}\cos\psi}{\dfrac{\delta}{\tau}} =$$

$$= \tilde{k}_{sd}k_{ad}\underset{\sim}{F_a}\sin\psi + \tilde{k}_1\frac{\tau}{\delta}\underset{\sim}{F_a}\cos\psi \text{ [u.r.]} \qquad (1.137)$$

în care:

k_{sd}, k_{sq} — coeficienți care țin cont de scăderea factorilor de raportare după cele două axe k_{ad} și k_{aq}, datorită saturației magnetice, coeficienți care se dau în figura 1.37 b (cu semnul — deasupra, pentru $\delta_M/\delta = 1$, iar cu semnul ~ deasupra, pentru $\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$). Coeficientul k_{sq} se folosește mai jos în relația (1.139);

k_1 — coeficient care ține cont de influența de slăbire a cîmpului longitudinal de către cîmpul transversal, datorită saturației magnetice ($\tilde{k}_1$ — pentru $\delta_M/\delta = 1$ și $\tilde{k}_1$ — pentru $\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$);

ψ — unghiul dintre fazorul curentului din indus $\underline{I}$ și t.e.m. principală $\underline{E}_0$ care are direcția axei transversale (q).

Determinarea solenației de excitație la sarcină nominală folosește caracteristicile magnetice în unități relative (fig. 1.38). Pentru obținerea valorilor în u.r., datele respective (din tabelul 1.9) se împart în valorile nominale ale mărimii respective (valorile nominale sînt cele care corespund tensiunii nominale U_{1N}). De exemplu, fluxurile se împart la Φ_{0N} (de pe coloana U_{1N}), iar t.m., t.m.m. și solenațiile F_a, F_{ad}, F_{aq} se împart la $U_{m0N} = \Sigma U_{mi}$ corespunzătoare lui U_{1N} (vezi rubricile respective în unități relative, subliniate cu simbolul ~).

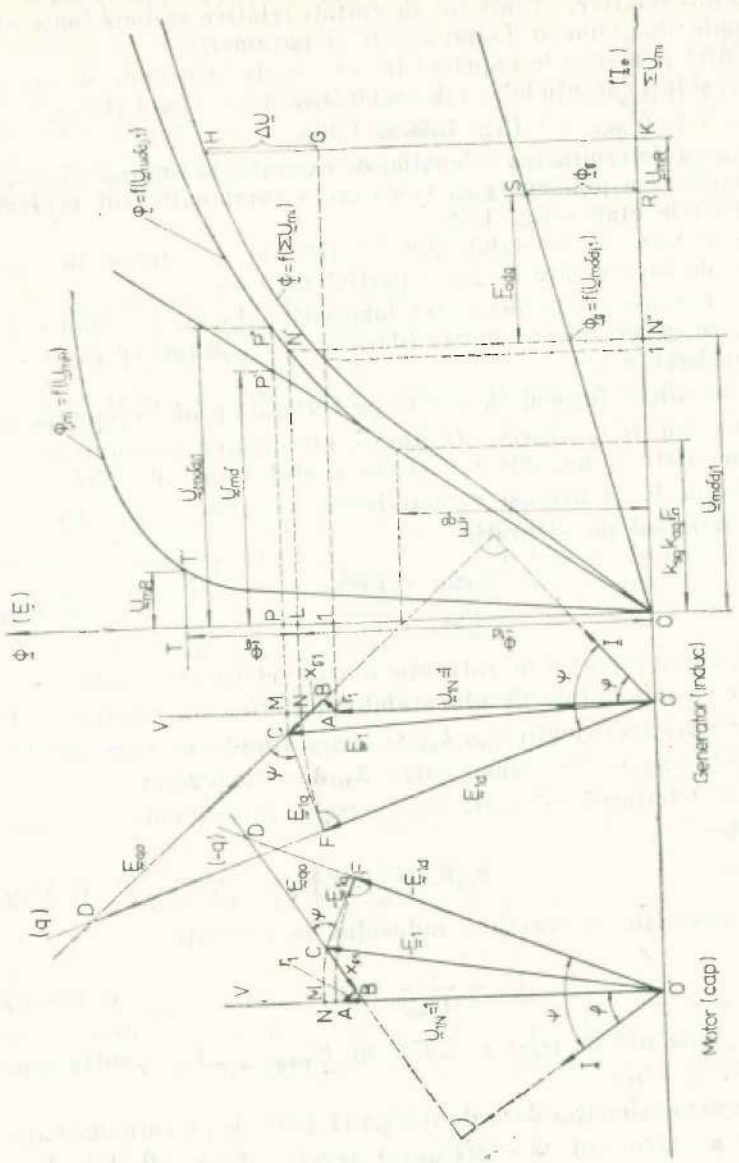


Fig. 1.38 — Determinarea solenației de excitație la sarcina nominală pentru mașinile sincrone cu poli aparenți și varianta combinată, prin metoda caracteristicilor magnetice parțiale.

Deoarece se lucrează cu mărimile caracteristicilor magnetice în unități relative, atunci tot în unități relative trebuie luate atît mărimile diagramelor fazoriale cît și parametrii.

Astfel pentru a le exprima în u.r., toate tensiunile se împart la U_{1N}, și toți curenții la I_N; de asemenea, în u.r. $\underset{\sim}{U}_{1N} = 1$; $\underset{\sim}{I}_N = 1$; $\underset{\sim}{\Phi}_{0N} = 1$ și $\underset{\sim}{U}_{m0N} = 1$ (fig. 1.38 și 1.39).

Pentru determinarea solenației de excitație la sarcină nominală a mașinilor cu poli aparenți și varianta combinată sînt necesare următoarele etape (fig. 1.38):

— se trasează cu datele din tabelul 1.9, caracteristicile magnetice (de funcționare în gol și parțiale), în u.r.;

— se construiește diagrama fazorială a t.e.m. rezultante E_1, în u.r. ca generator sau motor (dacă $r_1 \ll x_{\sigma 1}$ atunci se poate neglija rezistența r_1);

— se rabate fazorul $\underset{\sim}{E}_1 = \overline{0'C}$, pe verticală pînă în punctul M. Paralela din M la abscisă întîlnește prelungirea porțiunii liniare a caracteristicii magnetice parțiale a statorului $\underset{\sim}{\Phi} = f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d j1})$, în punctul P' și aceeași caracteristică, în punctul P''. Rezultă astfel raportul de saturație

$$\frac{\underset{\sim}{U}'_{m\delta d j1}}{\underset{\sim}{U}'_{m\delta}} = \frac{\overline{PP''}}{\overline{PP'}}; \qquad (1.138)$$

— pentru raportul de saturație dat de relația (1.138) și pentru legea de variație a întrefierului stabilită anterior, din figura 1.37 b, se determină coeficienții k_{sd}, k_{sq} și k_1 (cu liniuță (−) sus, pentru $\delta_M/\delta = 1$, sau cu (~) sus pentru $\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$);

— se determină solenația transversală, cu influența saturației magnetice

$$k_{sq} k_{aq} \underset{\sim}{F}_a \text{ [u.r.]} \qquad (1.139)$$

în care solenația de reacție a indusului, în u.r. este:

$$\underset{\sim}{F}_a = \frac{F_a}{U_{m0N}} \text{ [u.r.]} \qquad (1.139\ a)$$

unde, F_a este dat de relația (1.97), iar $U_{m0N} = \Sigma U_{mi}$ pentru U_{1N} (din tabelul 1.9);

— pentru solenația dată de relația (1.139), de pe caracteristica parțială a statorului $\underset{\sim}{\Phi} = f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d j1})$ rezultă t.e.m. fictivă $\underset{\sim}{E}_{q0}$, în u.r.;

— se ia în prelungirea lui $x_{\sigma 1}$, pe diagrama fazorială segmentul

$$\overline{CD} = \underset{\sim}{E}_{q0} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.140)$$

— dreapta $\overline{O'D}$, reprezintă direcția axei transversale (q) după care este dirijată t.e.m. longitudinală;

— din C se duce perpendiculara $\overline{CF}$ pe axa q, obținîndu-se componenta t.e.m. rezultante după axa longitudinală

$$\underset{\sim}{E}_{1d} = \overline{O'F} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.141)$$

— se rabate fazorul $\underset{\sim}{E}_{1d} = \overline{O'F}$, pe verticală pînă în punctul N. Paralela din N la abcisă, întîlnește caracteristica magnetică parțială a statorului $\underset{\sim}{\Phi} = f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d j1})$ în punctul N'. Perpendiculara din N' pe abscisă determină t.m. a indusului corespunzătoare t.e.m. rezultante

$$\underset{\sim}{U}_{m\delta d j1} = \overline{ON''} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.142)$$

— cu unghiul ψ, determinat din diagrama fazorială, se calculează cu relația (1.136) pentru $\delta_M/\delta = 1$ sau cu relația (1.137), pentru $\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$ solenația „eficientă" de reacție a indusului $\underset{\sim}{F}'_{ad\,q}$;

— se ia pe abscisă segmentul

$$\overline{N''R} = \underset{\sim}{F}'_{ad\,q} \text{ [u.r.]}$$

apoi din R se ridică o perpendiculară pe abcisă, rezultînd fluxul de scăpări al inductorului la funcționarea în sarcină nominală

$$\overline{RS} = \underset{\sim}{\Phi}_{\sigma} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.143)$$

— pe ordonată în continuarea fluxului rezultant în întrefier de pe axa longitudinală $\underset{\sim}{\Phi}_{1d}$ se ia segmentul

$$\overline{LT} = \underset{\sim}{\Phi}_{\sigma} \text{ [u.r.]}.$$

Paralela la abscisă din T, întîlnește caracteristica magnetică parțială a inductorului $\underset{\sim}{\Phi}_m = f(\underset{\sim}{U}_{mR})$ în T', rezultînd astfel t.m. a inductorului corespunzătoare t.e.m. rezultante

$$\underset{\sim}{U}_{mR} = \overline{TT'} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.144)$$

— din R se ia pe abscisă segmentul

$$\overline{RK} = \underset{\sim}{U}_{mR} \text{ [u.r.]}$$

rezultînd solenația de excitație la sarcină nominală, în unități relative

$$\overline{OK} = \underset{\sim}{F}_{eN} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.145)$$

Pentru a lucra acoperitor, ca urmare a unor abateri de la curbele de magnetizare sau ușoare modificări de dimensiuni constructive, se majorează valoarea obținută cu circa $4 \div 6\%$ rezultînd

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06)\underset{\sim}{F}'_{eN} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.145\ a)$$

Solenația de excitație la sarcină nominală, în A, este

$$F_{eN} = \underset{\sim}{F}_{eN} U_{moN} \text{ [A]}. \qquad (1.145\ b)$$

Căderea de tensiune, în procente, rezultă

$$\Delta U = \frac{\overline{KH} - \overline{KG}}{\overline{KG}} \cdot 100 \ [\%] \qquad (1.146)$$

care conform STAS 1893-78 nu trebuie să depășească 50%.

OBSERVAȚIE. Direcția axei transversale (q) și deci unghiul ψ de defazaj dintre fazorul t.e.m. principală E_0 și fazorul curentului din indus I se putea determina și din diagramele fazoriale ale mașinii sincrone reprezentate în figura 1.28.

Astfel, se observă că

$$\overline{CD} = \frac{X_{aq} I_q}{\cos \psi} = X_{aq} I$$

deoarece $I_q = I \cos \psi$.

Pentru cazul în care se lucrează cu diagrama în u.r. și la sarcină nominală ($I = I_{1N} = 1$), atunci $\overline{CD} = x_{aq}$. Valoarea lui x_{aq} se putea lua din relația (1.99). Această metodă nu este indicată, deoarece folosește pentru x_{aq}, valoarea nesaturată, ceea ce nu corespunde cu situația reală.

2. *Metoda diagramei Potier*

Metoda se aplică în special la mașinile sincrone cu poli înecați la care nesimetria după cele două axe este mult mai mică.

Determinarea solenației de excitație la sarcină nominală se face astfel (fig. 1.39) :

— se trasează cu datele din tabelul 1.9 (asociat cu 1.9 a) caracteristica magnetică de funcționare în gol, în unități relative $\Phi = f(\Sigma U_{mi})$;

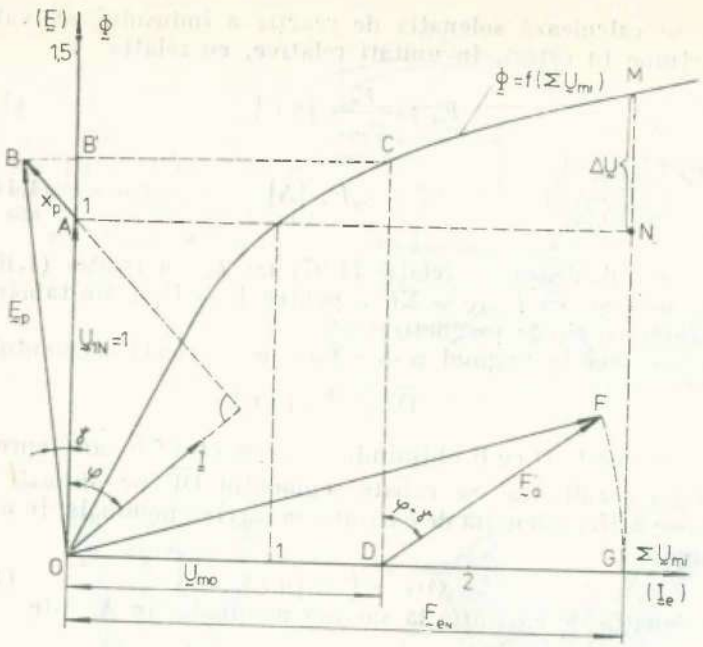


Fig. 1.39 — Determinarea solenației de excitație la sarcină nominală pentru mașinile sincrone cu poli înecați, cu ajutorul diagramei Potier.

— se ia pe ordonată $\overline{OA} = U_{1N} = 1$ u.r. ;

— se duce la unghiul φ față de verticală direcția curentului din indus I ;

— perpendicular pe direcția lui I se ia $\overline{AB} = x_p$ în u.r. unde, pentru mașinile cu poli înecați, reactanța Potier

$$x_p \approx x_{\sigma 1} + 0{,}02 \text{ [u.r.]} \qquad (1.147)$$

obținîndu-se t.e.m. Potier

$$\underset{\sim}{E}_p = \overline{OB} \text{ [u.r.]} ;$$

— se rabate $\overline{OB}$ pe verticală pînă în B', apoi se duce din B' o paralelă la abscisă care întîlnește caracteristica de funcționare în gol în C ;

— se coboară perpendiculara din C pe abscisă obținîndu-se punctul D ; segmentul $\overline{OD}$ reprezintă t.m.m. de funcționare în gol a mașinii ;

— se calculează solenația de reacție a indusului echivalentă (ca acțiune în rotor), în unități relative, cu relația

$$\underset{\sim}{F'_a} = \frac{\underset{\sim}{F'_a}}{U_{m0N}} \text{ [u.r.]} \qquad (1.148)$$

în care :

$$F'_a = k_a F_a \text{ [A]} \qquad (1.148\ a)$$

unde :

F_a se calculează cu relația (1.97) iar k_a cu relația (1.103 a) (se reamintește că $U_{m0N} = \Sigma U_{mi}$ pentru $E = U_{1N}$, din tabelul 1.9 al caracteristicii de magnetizare) ;

— se duce la unghiul $\varphi + \gamma$ față de verticală segmentul

$$\overline{DF} = \underset{\sim}{F'_a} \text{ [u.r.]} ;$$

— se unește O cu F obținîndu-se segmentul $\overline{OF}$ care reprezintă solenația rezultantă. Se rabate segmentul $\overline{OF}$ pe abscisă, obținîndu-se astfel solenația de excitație la sarcină nominală, în unități relative :

$$\overline{OG} = \underset{\sim}{F_{eN}} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.149)$$

Solenația de excitație la sarcină nominală, în A, este

$$F_{eN} = \underset{\sim}{F_{eN}} U_{m0N} \text{ [A]}. \qquad (1.149\ a)$$

Căderea de tensiune, în procente, rezultă

$$\Delta U = \frac{\overline{GM} - \overline{GN}}{\overline{GN}} \cdot 100 \text{ [\%]} \qquad (1.150)$$

care, conform STAS 1893-78, nu trebuie să depășească 50%.

1.10. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

Calculul înfășurării de excitație se face similar ca la mașina de curent continuu cu excitație separată (vol. I, paragraful 4.7.2).

Spre deosebire de mașina de curent continuu însă, la mașina sincronă normală înfășurarea de excitație, care se află pe rotor, este solicitată și la acțiunea forței centrifuge. De aceea construcția înfășurării de excitație trebuie să fie destul de rigidă pentru ca să nu sufere deformații în funcționare sau să nu apară fenomenul de măcinare a izolației, datorită vibrațiilor posibile în exploatare și deci pericolul străpungerii, mai ales față de masă.

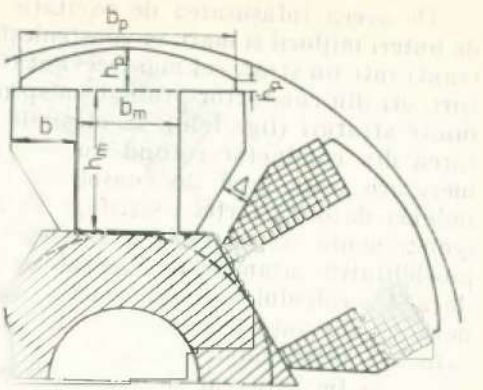


Fig. 1.40 — Înfășurarea de excitație cu bobine din conductor profilat (PE2S) în mai multe straturi.

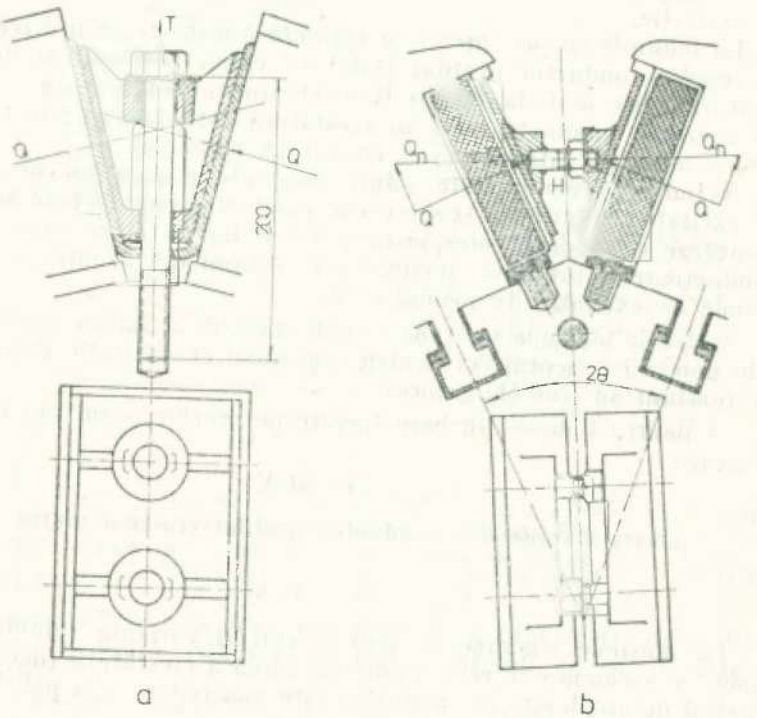


Fig. 1.41 — Distanțoare interpolare fixate cu șuruburi (a) sau cu tije filetate cu acțiune de pană (b).

De aceea înfășurarea de excitație *la mașinile cu poli aparenți* de puteri mijlocii și mari, se construiește din bare îndoite pe muchie (cant) într-un strat, cel mai frecvent (fig. 1.16 a), sau în două straturi, ori din conductor profilat cu spirele așezate în trepte, în mai multe straturi (fig. 1.40), la mașinile mici (sub 50 kVA). Înfășurarea din conductor rotund nu este indicată tocmai din motive mecanice (este greu de consolidat). Pentru evitarea deformării bobinei datorită forței centrifuge ce apare în timpul funcționării (componenta transversală a acesteia), trebuie avută în vedere și posibilitatea asamblării distanțoarelor interpolare (fig. 1.41), dacă din calculul mecanic rezultă necesitatea acestora. Este evident că distanțorii interpolari trebuie astfel construiți încît să satisfacă următoarele cerințe:

— să fie suficient de rezistenți mecanic;

— să fie cît mai ușori;

— să permită trecerea aerului de ventilație în lungul bobinelor de excitație.

La *mașinile cu poli înecați și varianta combinată* se utilizează, de regulă, conductor profilat izolat cu email tereftalic și două straturi de fire de sticlă (PE2S). Bobinele sînt concentrice (fig. 1.42), iar așezarea conductoarelor în crestătură este într-un strat cu latura mare pe lățimea b_{c2} a crestăturii rotorului.

Avînd în vedere aceste soluții adoptate pentru înfășurările de excitație, rezultă că și secțiunile conductoarelor trebuie să se încadreze în valorile corespunzătoare barelor (secțiuni mari) sau conductoarelor profilate, secțiuni care depind de curenții și tensiunile de excitație, în primul rînd.

Astfel, la mașinile sincrone cu poli aparenți se indică următoarele domenii (orientative) pentru tensiunile de excitație (limitele de tensiuni nu sînt obligatorii):

— pentru bobine din bare îndoite pe muchie (unul sau două straturi)

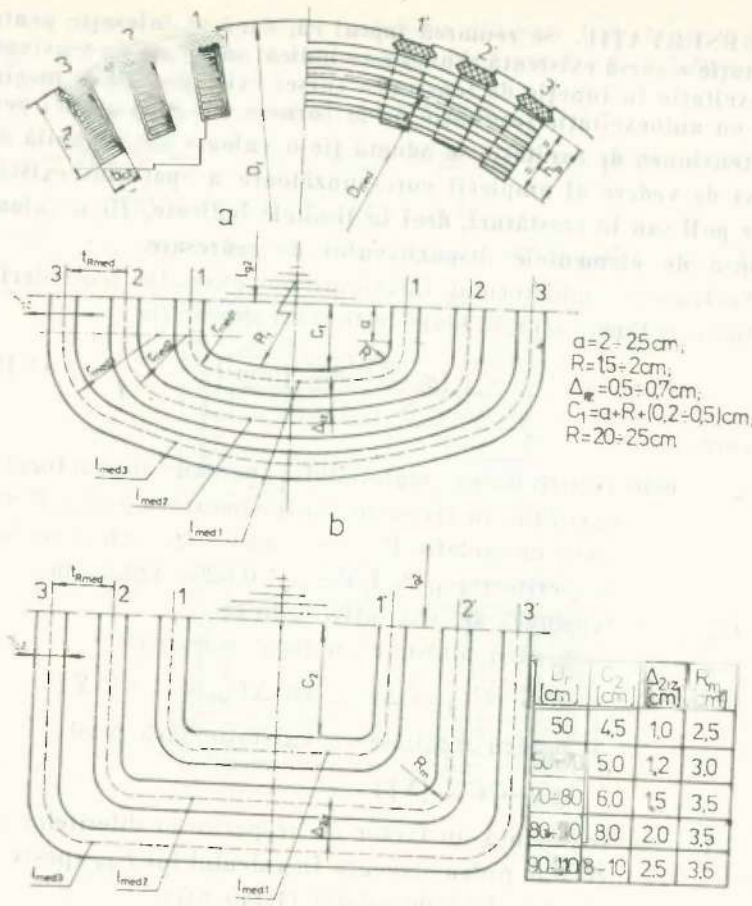
$$U_{eN} = 24 \div 80 \text{ V}; \qquad (1.151)$$

— pentru bobine din conductor profilat (în mai multe straturi)

$$U_{eN} = 75 \div 150 \text{ V}. \qquad (1.151\text{ a})$$

La mașinile sincrone cu poli înecați și varianta combinată, unde de asemenea se cere o umplere bună a crestăturii (deoarece spațiul de amplasare al excitației, este mai redus ca la polii aparenți) se recomandă

$$U_{eN} = 50 \div 100 \text{ V}. \qquad (1.152)$$



D_r (cm)	C_2 (cm)	Δ_{2-3} (cm)	R_m (mm)
50	4,5	1,0	2,5
50	5,0	1,2	3,0
70–80	6,0	1,5	3,5
80–90	8,0	2,0	3,5
90–110	8–10	2,5	3,6

Fig. 1.42 — Înfășurarea de excitație (cu dimensiunile capetelor frontale) a mașinilor sincrone cu poli înecați și varianta combinată:
a — vedere frontală; b — vedere desfășurată pentru mașinile cu $2p \geq 4$; c — vedere desfășurată pentru $2p=2$ (turbogeneratoare).

Pentru a face față diferitelor situații în exploatare, de multe ori, este necesară atît supraexcitarea mașinii cît și „forțarea excitației".

Din această cauză, sursa de excitație trebuie să fie capabilă să asigure tensiune de excitație, conform STAS 1893-78

$$U_{ef} = (1,4 \div 2)U_{eN} \text{ [V]}. \qquad (1.152\text{ a})$$

OBSERVAȚIE. Se remarcă faptul că, dacă se folosește pentru excitație o sursă existentă atunci este indicat să se adopte tensiunea de excitație în funcție de tensiunea sursei existente. Dacă mașina este cu autoexcitație (excitație de la bornele mașinii) atunci pentru tensiunea de excitație se adoptă fie o valoare convenabilă din punct de vedere al umplerii corespunzătoare a spațiului existent între poli sau în crestături, deci în limitele indicate, fie o valoare impusă de elementele dispozitivului de redresare.

Secțiunea conductorului înfășurării de excitație (considerînd că toate bobinele sînt în serie) este dată de relația

$$s_{ce} = 1{,}1\rho_\vartheta \frac{pF_{eN}l_{emed}}{U_e} \text{ [mm}^2\text{]} \qquad (1.153)$$

în care :

ρ_ϑ este rezistivitatea materialului pentru conductorul de excitație, în $\Omega mm^2/m$, la temperatura ϑ (°C). Pentru clasă de izolație F și $\vartheta = 140°C$ (pentru a se lucra acoperitor) $\rho_{140} \approx 1{,}48\rho_{20} = 0{,}0265\ \Omega mm^2/m$;

U_e — tensiunea de excitație, adică :

— pentru mașinile cu inele colectoare

$U_e = U_{eN} - \Delta U_{pe}$, cu $\Delta U_{pe} = 2 \div 3$ V ;

— pentru mașinile cu excitație fără perii

$U_e = U_{eN}$ [V] ;

1,1 — reprezintă un factor de acoperire al diferitelor erori ce s-ar putea strecura în calculul lui F_{eN} (peste majorarea dată de relația (1.145 a)) ;

l_{emed} — lungimea medie a spirei înfășurării de excitație, în m. Determinarea acestei lungimi se face, cel mai frecvent și exact, pe cale grafică prin construcția la scară a bobinei. Deoarece în această etapă, acest lucru nu este posibil se recomandă următoarele relații de estimare :

— pentru polii aparenți cu bobine din conductor profilat în mai multe straturi (fig. 1.40)

$$l_{emed} = 2[(l_m + b) + (b_m + b)] \text{ [m]} ; \qquad (1.154)$$

— pentru polii aparenți cu bobine din bare îndoite pe muchie (fig. 1.16 a), ale căror forme constructive pot fi ca în figura 1.43 rezultă :

— pentru forma din figura 1.43 b

$$l_{emed} = 2(l'_m + b_m - 2R) + \pi(2R + 2\delta_{iz} + 0{,}1b) \text{ [m]} ; \qquad (1.154 \text{ a})$$

— pentru forma din figura 1.43 c

$$l_{emed} = 2(l_m - 2b') + \pi(b_m + 2\delta_{iz} + 0{,}1b) \text{ [m]} \qquad (1.154 \text{ b})$$

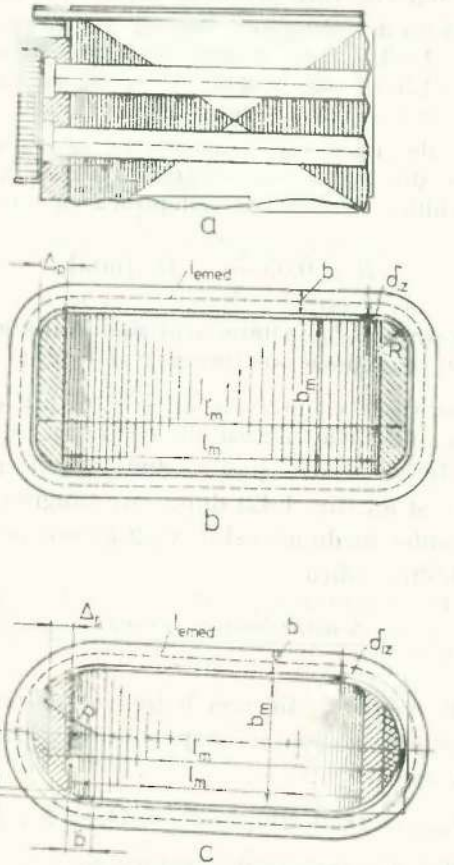


Fig. 1.43 — Secțiune longitudinală (a) și transversală (b și c) printr-un pol aparent cu bobine din conductor îndoit pe muchie.

unde :

b este lățimea bobinei care se poate estima astfel încît $b \approx (1 \div 1{,}1)\frac{b_p - b_m}{2}$, dar astfel încît (fig. 1.16 a și fig. 1.40), distanța dintre bobine să rezulte :

$\Delta \geqslant 1$ cm, cînd nu sînt distanțoare interpolare ;

$\Delta \geqslant d_b + (1 \div 1{,}2)$ cm cînd distanțoarele interpolare sînt prinse cu buloane de diametru d_b ;

$\delta_{iz} = 0{,}25 \div 0{,}3$ cm, este grosimea izolației față de pol ;

b' — distanța de rotunjire a muchiilor care se ia constructiv :
$b' = 1 \div 1{,}25$ cm, pentru $b_m = 6 \div 10$ cm ;
$b' = 1{,}5 \div 2$ cm, pentru $b_m = 10 \div 15$ cm ;
$b' = 2{,}5 \div 3$ cm, pentru $b_m = 15 \div 20$ cm ;

R — raza de îndoire pe muchie care se ia constructiv, însă care, din motive tehnologice (pentru a nu se îngroșa muchiile), trebuie să îndeplinească condiția :

$$R \geqslant 0{,}05\frac{b^2}{a} = R_c \text{ [mm]} \qquad (1.154\text{ c})$$

în care a și b, în mm, sînt dimensiunile conductorului care se îndoaie pe muchie ($b > a$) ;

— pentru mașinile cu poli înecați și varianta combinată, lungimea medie a spirei înfășurării de excitație, se determină din construcția grafică, la scară, pentru dimensiunile preliminare stabilite pentru h_{c2} și b_{c2} (fig. 1.42) după care lungimea medie rezultă ca media lungimilor medii ale celor $N_b/2$ bobine pe pol (pentru N_b vezi relația (1.69)), adică

$$l_{emed} = \frac{l_{emed1} + l_{emed2} + \ldots + l_{emedN_{b/2}}}{N_b/2} \text{ [m]} \qquad (1.154\text{ d})$$

unde, lungimile medii ale fiecărei bobine se determină în funcție de D_{med} și deschiderea bobinei respective (fig. 1.42) și unde diametrul mediu este

$$D_{med} = D_r - 2h_{c2} + h_b \approx D_r - h_{c2} \text{ [cm]}$$

iar pasul mediu al crestăturilor rotorului

$$l_{Rmed} = \frac{\pi D_{med}}{Z_2} \text{ [cm]}.$$

Valoarea secțiunii determinată cu relația (1.153) se stabilește definitiv din STAS 2873-78 (anexa 5), rezultînd valorile exacte atît a secțiunii cît și a dimensiunilor conductorului (pentru bare îndoite pe muchie, lățimea conductorului se păstrează în jurul valorii stabilită din lățimea b a bobinei, iar pentru poli înecați și variantă combinată în funcție de b_{c2}). Dimensiunile conductorului izolat se stabilesc ținînd cont și de anexa 6 din care se ia grosimea bilaterală a izolației, în funcție de dimensiunile conductorului.

Se stabilește apoi, *densitatea de curent* J_e, în A/mm², conform indicațiilor de la paragraful 1.3.1 B și rezultă curentul de excitație

$$I_e = s_{ce}J_e \text{ [A]} \qquad (1.155)$$

(se lucrează cu s_{ce} luat din STAS).

Numărul de spire, pe un pol, al înfășurării de excitație

$$w_e = \frac{F_{eN}}{2I_e} = \text{număr întreg.} \qquad (1.155\text{ a})$$

Pentru *mașinile cu poli înecați și variantă combinată*, numărul de spire pe pol trebuie stabilit astfel încît numărul de conductoare din crestătura rotorului (care este și numărul de spire al unei bobine) să fie număr întreg, adică

$$n_{c2} = \frac{2w_e}{N_b} = \text{număr întreg,}$$

de unde rezultă

$$w_e = \frac{n_{c2}N_b}{2}. \qquad (1.155\text{ b})$$

După rotunjirea la număr întreg a numărului de spire pe pol, se determină valoarea exactă a curentului de excitație la sarcină nominală.

$$I_{eN} = \frac{F_{eN}}{2w_e} \text{ [A]} \qquad (1.155\text{ c})$$

și valoarea exactă a densității de curent

$$J_e = \frac{I_{eN}}{s_{ce}} \text{ [A/mm²]}, \qquad (1.155\text{ d})$$

care trebuie să se încadreze în limitele indicate la paragraful 1.3.1 B.

Curentul de excitație la funcționarea în gol

$$I_{e0} = \frac{U_{m0N}}{2w_e} \text{ [A]}. \qquad (1.155\text{ e})$$

Verificări necesare

1. Se construiește la scară polul aparent *pentru mașinile cu poli aparenți*, pe care se asamblează cele w_e spire, respectînd distanțele de izolație față de pol și dintre bobine, construcție din care rezultă dimensiunile exacte și definitive ale bobinei și înălțimii h_m a polului. Bobinele din bare îndoite pe muchie se pot freza (la bază) pînă la maxim 1/3 din b (vezi fig. 1.16 d), dacă este necesar.

2. Se stabilesc, *pentru mașinile cu poli înecați și varianta combinată*, dimensiunile exacte ale crestăturilor rotorului

$$b_{c2} = (b_{cond} \times \text{nr. conductoarelor pe lățime}) + b_{iz};$$

$$h_{c2} = n_{c2} h_{cond} + h_{iz} \qquad (1.156)$$

astfel încît să se respecte dimensiunile dintelui mare (pentru păstrarea inducției maxime la baza acestuia, în limite). De regulă numărul conductoarelor pe lățimea crestăturii este unu (conductoarele se așează pe un rînd). Dacă dimensiunile conductorului rezultă prea mari și nu se poate executa (tehnologic) sau dacă valoarea lui U_{eN} este impusă la valori mari (și deci I_e este mic rezultînd w_e mare) atunci se pot așeza cele n_{c2} conductoare pe două rînduri (cu o izolație între rînduri de 0,25 mm).

Semnificația lui b_{iz} și h_{iz} este aceeași ca și la stabilirea dimensiunilor crestăturilor statorului (indusului) adică:

b_{iz} este suma tuturor izolațiilor pe lățimea crestăturii, inclusiv jocul;

h_{iz} — suma tuturor izolațiilor pe înălțimea crestăturii, inclusiv pana, jocul și istmul crestăturii.

3. Se calculează, după construcția la scară a bobinelor de excitație, lungimile medii ale spirelor de excitație după care se verifică încadrarea tensiunii de excitație în valoarea stabilită, adică

$$U_e = R_{e\vartheta} I_{eN} \text{ [V]} \qquad (1.157)$$

în care:

$$R_{e\vartheta} = \rho_\vartheta \frac{2pw_e l_{emed}}{s_{ce}} \text{ [}\Omega\text{]} \qquad (1.157\text{ a})$$

unde se consideră ca și în cazul inițial $\vartheta = 140°C$.

Pentru mașinile care au alimentarea excitației prin perii și inele colectoare, tensiunea nominală de excitație, considerînd și căderea de tensiune pe perechea de perii

$$\Delta U_{pe} = 2{,}5 \div 3 \text{ V}$$

la contactul dintre inele și perii, este

$$U_{eN} = U_e + \Delta U_{pe} \text{ [V]} \qquad (1.157\text{ b})$$

iar, tensiunea de excitație la funcționarea în gol, considerînd același ΔU_{pe}

$$U_{e0N} = U_{e0} + \Delta U_{pe} = R_{e\vartheta a} I_{e0} + \Delta U_{pe} \text{ [V]} \qquad (1.157\text{ c})$$

unde rezistența excitației la $\vartheta_a \approx 50°C$, este

$$R_{e\vartheta a} \approx 0{,}75 R_{e\vartheta} \text{ [}\Omega\text{]}. \qquad (1.157\text{ d})$$

Dacă U_{eN}, nu se încadrează în limitele dorite, atunci se schimbă secțiunea conductorului (tot din STAS), evident cu verificarea limitelor densității de curent J_e.

Puterea de excitație nominală a mașinii

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} \text{ [W]} \qquad (1.158)$$

valoare care se ia în calculul randamentului.

Puterea excitatoarei însă, conform relației (1.152 a) trebuie să poată asigura valoarea (pentru timp limitat)

$$P_{ee} \approx (1{,}4 \div 2) P_{eN} \text{ [W]}. \qquad (1.158\text{ a})$$

În general, prin excitatoare se înțelege o mașină de curent continuu executată special, astfel încît să satisfacă cerințele menționate. La generatoarele sincrone, în ultimul timp, se extinde din ce în ce mai mult așa-zisa *excitație fără perii*, la care excitatoarea este un generator sincron auxiliar de construcție inversă (cu inductorul pe stator), a cărei înfășurare rotorică a indusului este conectată la un redresor rotativ, fixat pe același arbore. La bornele de curent continuu ale redresorului rotativ este legată direct înfășurarea de excitație a mașinii sincrone principale (fig. 1.44) eliminîndu-se astfel orice contact alunecător (colectorul excitatoarei, inelele colectoare ale mașinii sincrone, periile) ale căror dezavantaje sînt cunoscute.

ATENȚIE! Este evident faptul că schema din figura 1.44 nu se poate utiliza și la motoarele sincrone cu pornirea în asincron, deoarece în perioada pornirii, t.e.m. indusă în înfășurarea de excitație va fi redresată de puntea redresoare rotativă și, ca urmare, în înfășurarea de excitație va circula un curent continuu care va excita deci motorul, făcînd astfel imposibilă pornirea în asincron a lui.

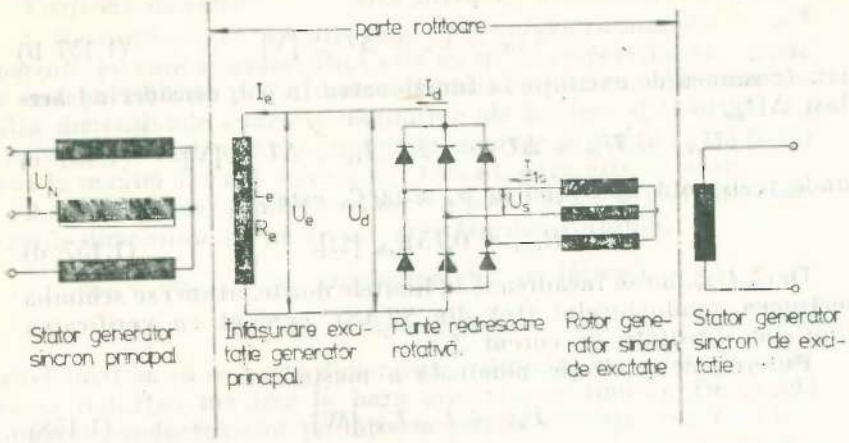


Fig. 1.44 — Schema sistemului de excitație fără perii, pentru generatoarele sincrone.

La utilizarea sistemului de excitație fără perii trebuie determinate datele nominale, de calcul, ale generatorului sincron auxiliar de excitație, în funcție de datele excitației generatorului sincron principal. Cel mai frecvent aceste generatoare sincrone de excitație sînt trifazate, ele fiind conectate direct la o punte redresoare rotativă trifazată, soluție care se va avea în vedere în cele ce urmează.

Astfel, pe baza schemei indicate în figura 1.44 și a notațiilor folosite, se stabilesc :

— *Datele nominale, în curent continuu*, ale redresorului rotativ :

— *tensiunea nominală continuă*, sau valoarea medie redresată, avînd în vedere că lipsesc contactele alunecătoare

$$U_d = U_{eN} \text{ [V]}; \tag{1.159}$$

— *curentul redresat* (valoarea medie a curentului rezultant)

$$I_d = I_{eN} \text{ [A]} \tag{1.159 a}$$

iar valoarea medie a pulsurilor de curent pe o ramură a punții, în funcție de care se aleg diodele redresoare

$$I_{da} = I_d/m = I_d/3 \text{ [A]}. \tag{1.159 b}$$

— *Datele nominale, în curent alternativ* ale redresorului, deci și ale generatorului sincron de excitație, în funcție de care acesta se dimensionează :

— *componenta continuă*, sau valoarea medie redresată a *tensiunii*, considerînd redresorul ideal (la care nu se ține cont de fenomenul de comutație)

$$U_{d0} = 2\sqrt{2}U_{1s}\frac{\sin\frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \text{ [V]} \tag{1.160}$$

în care :

U_{1s} este tensiunea efectivă (valoarea eficace) pe fază, a generatorului sincron de excitație ;

m — numărul de faze.

În cazul de față, pentru $m = 3$ și considerînd $U_{d0} \approx U_d$, se obține

$$U_d \approx 2{,}34U_{1s} \text{ [V]}, \tag{1.160 a}$$

din care rezultă, tensiunea efectivă (valoarea eficace) pe fază

$$U_{1s} = \frac{U_d}{2{,}34} = 0{,}427\,U_d \text{ [V]}. \tag{1.160 b}$$

Tensiunea nominală (de linie) a generatorului sincron de excitație va fi

$$U_{sN} = \sqrt{3}U_{1s} = \sqrt{3}\cdot 0{,}427U_d \approx 0{,}74U_d \text{ [V]}; \tag{1.160 c}$$

— *valoarea efectivă (eficace) a curentului de fază* din înfășurarea generatorului sincron de excitație, depinde de caracterul sarcinii (inductivă, rezistivă etc). Deoarece inductanța circuitului principal, este mult mai mare decît rezistența sa, se poate determina curentul pentru situația în care $L_e \approx \infty$.

În acest caz, valoarea efectivă a curentului alternativ, de fază, va fi

$$I_{1s} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}I_d = 0{,}815I_d \text{ [A]}. \tag{1.160 d}$$

După cum s-a menționat, relațiile (1.160 c) și (1.160 d), au rezultat pe baza unor ipoteze simplificatoare, legate atît de neglijarea fenomenului de comutație cît și de considerarea caracterului pur inductiv al înfășurării de excitație a generatorului principal, care constituie sarcina redresorului rotativ.

În realitate, aceste ipoteze nu sînt valabile în totalitate, ele depinzînd de o serie de factori cum ar fi caracterul sarcinii, raportul dintre sarcina de lucru și cea nominală, sau dintre tensiunea de lucru și cea nominală etc.

De aceea, din practica de fabricație, confirmată experimental pe o serie de mașini sincrone deja construite, au rezultat că se pot considera, mai aproape de situațiile reale, pentru *datele nominale* ale generatorului sincron de excitație (auxiliar), valorile

$$U_{sN} \approx 0{,}8U_d \text{ [V]}; \qquad (1.160\ e)$$

$$I_{1s} \approx 0{,}78I_d \text{ [A]};$$

— *factorul de putere* al generatorului sincron de excitație, depinde de procesul de comutare al diodelor care se face cum se știe, cu un consum de putere reactivă, consum care depinde la rîndul său de situațiile de lucru menționate mai sus. Determinarea exactă a factorului de putere este foarte anevoioasă, necesitînd descompunerea în armonici a formelor undelor tensiunii și curentului din înfășurări în timpul redresării, stabilind apoi decalajul între fundamentale. Practic, cu suficientă precizie, se poate determina factorul de putere cu relația

$$\cos\varphi = \frac{U_d I_d}{\sqrt{3}U_{sN}I_{1s}} \qquad (1.160\ f)$$

din care, dacă se fac înlocuirile cu valorile date de relațiile (1.160 e) rezultă

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{3}\cdot 0{,}8\cdot 0{,}78} \approx 0{,}92. \qquad (1.160\ g)$$

S-au stabilit astfel principalele date nominale de calcul ale excitatoarei sincrone.

— Turația este, în mod evident, cea a generatorului sincron pe care-l deservește, excitatoarea fiind de regulă asamblată în partea opusă antrenării generatorului principal, pe același arbore.

— Numărul de poli, deci și frecvența, nu au un rol deosebit funcțional, ci constituie mai mult o problemă pentru dimensionarea mașinii în sine. Totuși din motive de redresare și pentru a avea mașini mai scurte se recomandă o frecvență mai mare de 50 Hz (cel mai frecvent 60÷75 Hz). Calculul electromagnetic al excitatoarei sincrone se va efectua în conformitate cu cele indicate pentru mașinile sincrone normale. Se va ține cont însă de faptul că generatorul sincron de excitație lucrează cu o sarcină

puternic deformantă, și deci cu prezența unui număr mare de armonici, care vor produce pierderi suplimentare în sarcină atît în fier cît și electrice. Se vor lua deci, pe cît posibil mai mult, măsuri de amortizare directe sau indirecte (cu piese masive și în special întrefier mărit), iar solicitările magnetice și electrice se vor alege spre limitele inferioare ale valorilor recomandate în mod normal.

1.11. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRILOR ROTORULUI (INDUCTORULUI) ÎN REGIM STAȚIONAR

Se folosesc parametrii rotorului raportați la indus (stator) în unități relative. Criteriile de raportare sînt cele clasice adică între rotorul real și cel echivalent (raportat) trebuie respectate egalitățile fundamentalelor tensiunilor magnetice, pierderilor și energiilor magnetice (este vorba de energiile cîmpurilor de scăpări).

1.11.1. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

A. **Rezistența înfășurării de excitație**

— Pentru *mașinile cu poli aparenți și varianta combinată*, rezistența înfășurării de excitație, în unități relative, este

$$r_e = \rho_\vartheta \frac{k_{ad}^2}{\pi^2} \frac{F_a}{f_1 \Phi_{1N}} \frac{l_{emed}}{w_e s_{ce}} (k_{de} + 1) \text{ [u.r.]} \qquad (1.161)$$

în care (pentru clasă de izolație F cu $\vartheta = 115°C$):

$$\rho_{115} = 1{,}38\rho_{20} = 0{,}0246 \ \Omega\text{mm}^2/\text{m};$$

Φ_{1N} este fluxul undei fundamentale pentru U_{1N}, în Wb, determinat cu relația (1.27 e);

l_{emed} — lungimea medie a spirei înfășurării de excitație calculată exact (după construcția la scară) ca în paragraful 1.10, în m;

s_{ce} — secțiunea conductorului de excitație, în mm²;

k_{de} — coeficientul de multiplicitate al rezistenței de descărcare, față de rezistența proprie a înfășurării de excitație. Deoarece această rezistență se introduce în rotor numai în perioada pornirii în asincron, rezultă următoarele valori:

— pentru motor, la calculul pornirii în asincron

$$k_{de} = 10; \qquad (1.161\ a)$$

— pentru generator sau motor (în funcționare sincronă normală)

$$k_{de} = 0. \qquad (1.161\ b)$$

— Pentru *mașinile cu poli înecați*, rezistența înfășurării de excitație, în unități relative, este dată de o relație similară cu cea de la poli aparenți și varianta combinată, adică

$$r_e = \rho_\vartheta \frac{k_a^2}{\pi^2} \frac{F_a}{f_1 \Phi_{1N}} \frac{l_{emid}}{w_e s_{ce}} (k_{de} + 1)\ [\text{u.r.}] \qquad (1.162)$$

în care, k_a este dat de relația (1.103 a).

Și în acest caz $k_{de} \neq 0$ are semnificație, numai pentru calculul pornirii în asincron, dacă mașina este prevăzută cu colivie de pornire în asincron; dacă mașina este destinată pentru regimul de generator, sau chiar pentru motor la funcționarea în sincronism, $k_{de} = 0$.

OBSERVAȚIE. Cum s-a menționat, în cazul mașinilor cu poli înecați, mărimile se consideră sinusoidale (vezi paragraful 1.1.5 B). Rezultă deci că, pentru mașinile cu poli înecați

$$\Phi_{1N} = \Phi_{0N}. \qquad (1.162\ a)$$

B. **Reactanțele înfășurării de excitație**

— *Reactanța totală* a înfășurării de excitație, în unități relative, este:

— pentru mașinile cu *poli aparenți* [9]

$$x_e = \frac{\mu_0 F_a l_i}{\Phi_{1N}} \frac{8}{\pi} k_{ad}^2 \lambda_{es} + \frac{\sqrt{2} k_{ad}}{k_B} x_{ad}\ [\text{u.r.}] \qquad (1.163)$$

în care:

$\lambda_{es} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl}$, este permeanța specifică totală cu (vezi fig. 1.16 a):

$$\lambda_{ml} = 0{,}29 h_m / c_m + 0{,}112 b_m / l_m\ ; \qquad (1.163\ a)$$

$$\lambda_{pl} = 1{,}12 \left(\frac{h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D}}{c_p} - 0{,}25 \right) + 0{,}44 \left(\frac{b_p - b_m}{2c_p} + 0{,}2 \right) - 0{,}32 \left(\frac{b_p - b_m}{2c_p} - 0{,}5 \right)^2 ; \qquad (1.163\ b)$$

l_i, se introduce în m;

— pentru mașinile cu *poli înecați**

$$x_e = \frac{\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}} \frac{16}{\pi} k_a^2 \left[\frac{l_2}{2N_b} (\lambda_{ce} + \lambda_{Rcd}) + k_{f\sigma} \tau \right] + (\sigma_{e\delta} + 1) x_{ad}\ [\text{u.r.}] \qquad (1.164)$$

în care (vezi fig. 1.32):

λ_{ce} este permeanța specifică a scăpărilor în crestătură;

λ_{Rcd} — permeanța specifică a scăpărilor de la dinte la dinte;

$$\lambda_{ce} = \frac{h_2}{3 b_{c2}} + \frac{h_{02}}{b_{c2}}\ ; \qquad \lambda_{Rcd} = 0{,}2 + \frac{\delta}{2 t_R}\ ; \qquad (1.164\ a)$$

k_a — vezi relația (1.103 a);

$$\sigma_{e\delta} = 2 k_a \left(1 - \frac{2}{3} \gamma \right) - 1\ ; \qquad (1.164\ b)$$

$k_{f\sigma}$ — coeficient de scăpări pe unitatea de lungime a pasului polar rotoric. Pentru construcțiile normale ale înfășurărilor de excitație $k_{f\sigma} \approx 0{,}1$;

l_2 — lungimea geometrică a rotorului, în m;

t_R — pasul dentar al rotorului, în m (δ, în m).

Pentru γ și N_b, vezi relațiile (1.59) respectiv (1.69):

— pentru mașinile cu *rotorul în variantă combinată*, ținînd cont că piesa polară este ca la mașina cu poli aparenți, iar înfășurarea ca la mașina cu poli înecați rezultă

$$x_e = \frac{\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}} \frac{8}{\pi} k_{ad}^2 \left[l_i \lambda_{pl} + \frac{l_2 \lambda_{ce}}{N_b} + 0{,}05 t_R \right] + \frac{\sqrt{2} k_{ad}}{k_B} x_{ad}\ [\text{u.r.}] \qquad (1.165)$$

în care (fig. 1.18 a):

λ_{pl}, se calculează cu relația (1.163 b), dar în care în locul lățimii polului b_m, se va utiliza lățimea maximă a dintelui mare $b_{DR\max}$ obținută cu relațiile (1.128 a).

*A. Nicolaide: „Calculul reactanței de scăpări a înfășurării de excitație a mașinilor sincrone cu poli înecați".

Celelalte elemente sînt cele specificate mai sus, la variantele cu poli aparenți și înecați.

— *Reactanța de scăpări* a înfășurării de excitație, pentru toate variantele de rotor, se obține scăzînd din reactanța totală, reactanța utilă a înfășurării de excitație care, în unități relative, este egală cu x_{ad}, adică :

$$x_{\sigma e} = x_e - x_{ad} \text{ [u.r.]}. \tag{1.166}$$

OBSERVAȚIE. La mașina cu poli înecați, se are în vedere că reactanțele utile corespunzătoare cîmpului de reacție a indusului după cele două axe, sînt conform [4] aproximativ egale, adică

$$x_{ad} \approx x_{aq} \approx x_a \text{ [u.r.]}. \tag{1.167}$$

Conform [13] însă se consideră

$$\begin{aligned} x_{ad} &= x_a \text{ [u.r.]} ; \\ x_{aq} &\approx 0{,}9 x_{ad} \text{ [u.r.]}. \end{aligned} \tag{1.167 a}$$

1.11.2. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII DE AMORTIZARE

După cum reiese din paragraful 1.7 și 2.24, pot fi prevăzute cu înfășurare de amortizare distinctă atît mașinile sincrone cu poli aparenți și variantă combinată (montată în piesele polare) cît și cele cu poli înecați (montată în dinții mari ai rotorului și, cînd este posibil, și în dinții mici de lîngă dintele mare).

Constructiv, înfășurarea de amortizare (de pornire în asincron) poate fi cu inele de scurtcircuitare complete (segmentele de scurtcircuitare ale fiecărui pol se unesc între ele cu lipitură tare) cînd se mai numește și *înfășurare de amortizare longitudinal-transversală*, sau cu inele de scurtcircuitare incomplete (segmente de scurtcircuitare separate pe fiecare pol) cînd se mai numește și *înfășurare de amortizare longitudinală*.

Se menționează însă, că în cazul inelelor de scurtcircuitare incomplete, curenții din înfășurarea de amortizare după axa transversală se închid, de la pol la pol, prin masa miezului magnetic al rotorului, solicitînd termic foarte mult, mai ales în cazul regimurilor tranzitorii frecvente, elementele de fixare ale polilor sau

pieselor polare (vezi și paragraful 1.7). Rezultă deci că și în aceste cazuri a inelelor de scurtcircuitare incomplete, există și o amortizare transversală, nu numai longitudinală.

Datorită faptului că inițial înfășurarea de amortizare era proprie numai mașinilor cu poli aparenți, majoritatea lucrărilor din acest domeniu indică relații de calcul al parametrilor înfășurării de amortizare numai pentru acest tip de mașini sincrone [4], [5], [11] și [13].

Cercetări deosebite privind determinarea parametrilor înfășurării de amortizare, pentru diferite forme constructive, cu luarea în considerație a tuturor fenomenelor ce apar, au fost făcute în țara noastră de către A. Nicolaide [9] și [10], care a stabilit expresii analitice ale parametrilor înfășurării de amortizare, valabile atît pentru mașinile cu poli aparenți și varianta combinată cît și pentru cele cu poli înecați ; rezultă valori ale parametrilor care pot fi utilizate și în studiul fenomenelor tranzitorii în cadrul teoriei generale a dublei reacții.

Astfel, conform [9], aceste expresii ale parametrilor înfășurării de amortizare, adoptate și în lucrarea de față, au fost stabilite admițînd următoarele ipoteze simplificatoare, ipoteze care sînt în concordanță cu situațiile reale :

— rezistența și reactanța de scăpări sînt aceleași pentru toate barele ;

— distribuția curentului în barele coliviei de amortizare nu este modificată de segmentele de scurtcircuitare și de cîmpul magnetic de reacție produs de colivie ;

— se neglijează curenții din fierul rotorului ;

— colivia de amortizare este simetrică față de axa polului, iar barele sînt egal distanțate pe piesa polară sau pe dintele mare ;

— se neglijează saturația magnetică. Dacă nu se neglijează atunci saturația istmului crestăturii de amortizare se ia în considerație ca în vol. II paragraful 1.8.5 ;

— coeficientul lui Carter se consideră constant în lungul pasului polar. De aceea la mașinile cu poli înecați, la care dintele mare este necrestat, se va avea în vedere coeficientul lui Carter echivalent ;

— se consideră numai armonica fundamentală a tensiunii magnetice a înfășurării indusului.

A. **Rezistențele înfășurării de amortizare**

— Rezistența după *axa longitudinală*, pentru *inele de scurtcircuitare complete*, raportată la stator și în unități relative

$$r_d = \rho_{Cu\,\vartheta} \frac{F_a}{2f_1\Phi_{1N}} \left(\frac{k_r k_b l_b}{s_a} + \frac{k_i \tau C_d}{s_i} \right) \frac{1}{4C_D} \text{ [u.r.]} \qquad (1.168)$$

în care :

k_r este coeficientul de majorare a rezistenței barelor de amortizare datorită refulării curentului. Pentru bare rotunde cu $d_a \leqslant 12$ mm sau pentru bare dreptunghiulare normale cu $h/b \leqslant 3$, se ia $k_r = 1$. Pentru $h/b > 3$, influența refulării curentului se ia ca la mașinile asincrone cu bare înalte (vezi vol. II) ;

k_b, k_i — raportul dintre rezistivitatea materialului barelor (k_b), respectiv inelului de scurtcircuitare (k_i) și rezistivitatea cuprului care, în funcție de materialele utilizate au valorile :

— pentru cupru	1,0 ;	(1.168 a)
— pentru alamă	4,0 ;	
— pentru oțel	8,0 ;	
— pentru bronz	8,0 ÷ 10,0 ;	

$\rho_{Cu\vartheta} = 1{,}38\rho_{20} = 0{,}0246\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ este rezistivitatea cuprului la $\vartheta = 115°\text{C}$;

l_b — lungimea barei de amortizare (între inelele de scurtcircuitare) în m, care se ia constructiv (din desenul polului) sau cît lungimea piesei polare ori lungimea geometrică a rotorului (pentru poli înecați), la care se mai adaugă o lățime a inelului de scurtcircuitare;

s_a, s_i — secțiunile barei, respectiv inelului (segmentului) de scurtcircuitare, în mm^2 ;

τ — pasul polar, în m ;

C_d, C_D — coeficienți care rezultă din raportarea înfășurării de amortizare la înfășurarea statorului și se iau din figura 1.45 a, respectiv figura 1.46 a, în funcție de numărul barelor pe pol n_a și de unghiul

$$2\beta = \frac{(n_a - 1)t_a}{\tau} \cdot 180° \text{ [°el]}, \qquad (1.168 \text{ b})$$

care este unghiul electric dintre barele extreme ale aceluiași pol (vezi fig. 1.16 b și d). Pentru varianta combinată, atît la alegerea din curbe cît și în relația unghiului 2β (vezi și fig. 1.18 c), în locul lui n_a se va folosi $n'_a = n_a + 1$.

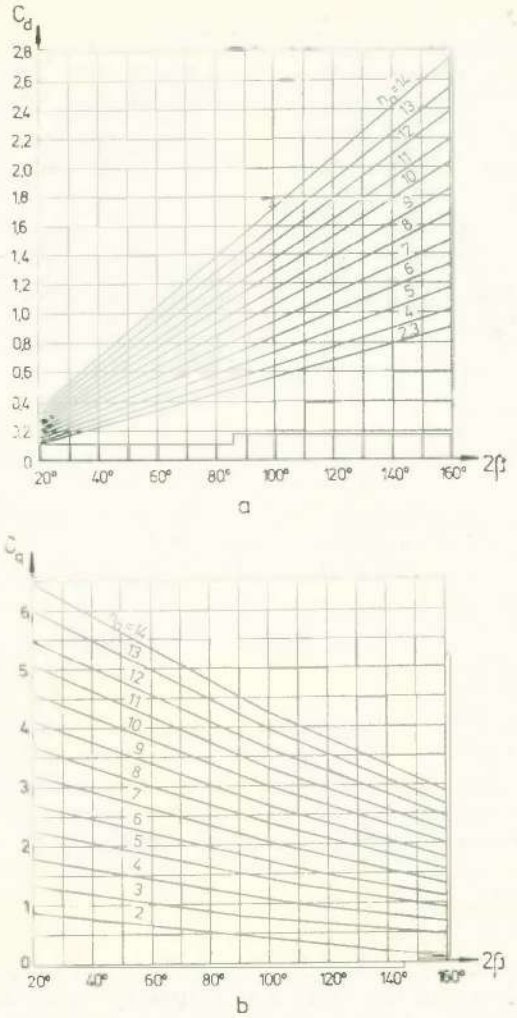


Fig. 1.45 — Curbele coeficienților C_d și C_e, în funcție de unghiul 2β și de numărul barelor de amortizare pe pol n_a.

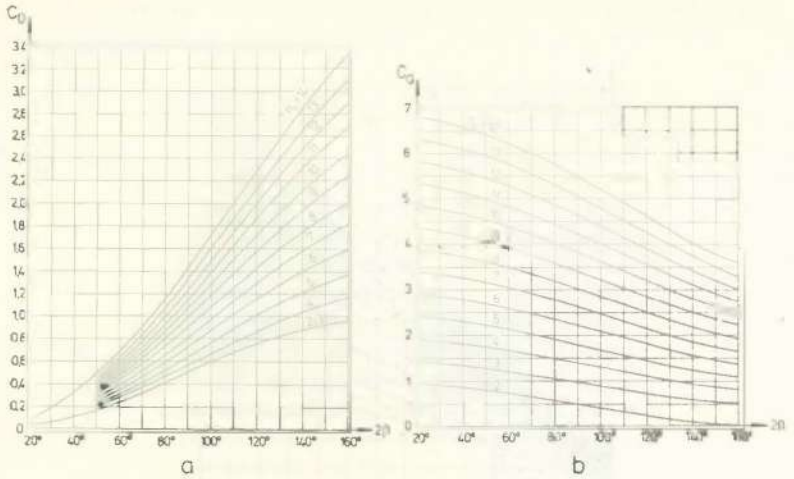


Fig. 1.46 — Curbele coeficienților C_D și C_Q, în funcție de unghiul 2β și de numărul barelor de amortizare pe pol n_a.

— Rezistența după *axa transversală*, pentru *inele de scurtcircuitare complete*, raportată la stator și în unități relative

$$r_q = \rho_{Cu\vartheta} \frac{F_a}{2f_1\Phi_{1N}} \left(\frac{k_r k_b l_b}{s_a} + \frac{k_i \tau C_q}{s_i} \right) \frac{1}{4C_Q} \text{ [u.r.]} \qquad (1.169)$$

în care :

C_q, C_Q au aceeași semnificație ca și C_d și C_D și se iau din figura 1.45 b, respectiv figura 1.46 b în funcție de aceleași mărimi (n_a și 2β). Pentru mașinile în variantă combinată, deoarece lipsește bara din mijloc (spațiu necesar șuruburilor de prindere a piesei polare) în relația (1.169) se vor folosi :

$$C_q \approx C_{q\,\text{curbe}} - 0{,}3 ; \qquad (1.169\ a)$$

$$C_Q = C_{Q\,\text{curbe}} - 0{,}5$$

unde $C_{q\,\text{curbe}}$ și $C_{Q\,\text{curbe}}$ sînt valorile lui C_q și C_Q luate din curbele din figura 1.45 b, respectiv figura 1.46 b, pentru $n_a' = n_a + 1$ (2β se calculează tot cu n_a').

Semnificația celorlalți termeni este cea din relația (1.168).

Pentru *inele de scurtcircuitare incomplete* (segmente de scurtcircuitare separate pentru fiecare pol) rezultă [9] :

— rezistența după axa longitudinală r_d, este dată de relația (1.168) ca și pentru inele complete ;

— rezistența după axa transversală (din datele aexperimentale)

$$r_q \approx (3 \div 4) r_d \text{ [u.r.]}. \qquad (1.170)$$

B. Reactanțele de scăpări ale înfășurării de amortizare

— Reactanța de scăpări după *axa longitudinală*, pentru *inele de scurtcircuitare complete*, raportată la stator și în unități relative

$$x_{ad} = \frac{\pi \mu_0 F_a}{\Phi_{1N}} [l_{Fe2}(\lambda_{ca} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa} \tau C_d] \frac{1}{4C_D} + \sigma_{ad} x_{ad} \text{ [u.r.]} \qquad (1.171)$$

în care :

l_{Fe2} este lungimea fierului piesei polare sau a rotorului (pentru poli înecați), în m ;

λ_{ca} — permeanța specifică a scăpărilor în crestătura înfășurării de amortizare :

— pentru crestătură rotundă (fig. 1.16 d)

$$\lambda_{ca} = \left(0{,}785 - \frac{b_0}{2d_a}\right) + \frac{h_0}{b_0} ; \qquad (1.171\ a)$$

— pentru crestătura dreptunghiulară, cu istmul h_0 și b_0

$$\lambda_{ca} = \frac{h}{3b_c} + \frac{h_0}{b_0} \qquad (1.171\ b)$$

cu h, înălțimea barei ;

λ_{da} — permanența specifică a scăpărilor la capetele dinților

$$\lambda_{da} = \frac{5\frac{\delta}{b_0}}{5 + 4\frac{\delta}{b_0}} ; \qquad (1.171\ c)$$

λ_{fa} — permeanța specifică de scăpări a inelelor de scurtcircuitare, pe unitatea de lungime a pasului polar. În medie se poate lua

$$\lambda_{fa} \approx 0{,}3 ; \qquad (1.171\ d)$$

σ_{ad} — coeficientul scăpărilor suplimentare longitudinale care, pentru mașinile cu *poli înecați* ($k_d = 1$) se ia din figura 1.47 a. Pentru mașinile *cu poli aparenți și varianta combinată*, pentru care $k_d \neq 1$, în relația (1.171) se va introduce

$$\sigma_{ad} = (1 + \sigma_{ad\,\text{curbe}}) k_d - 1 \qquad (1.171\ e)$$

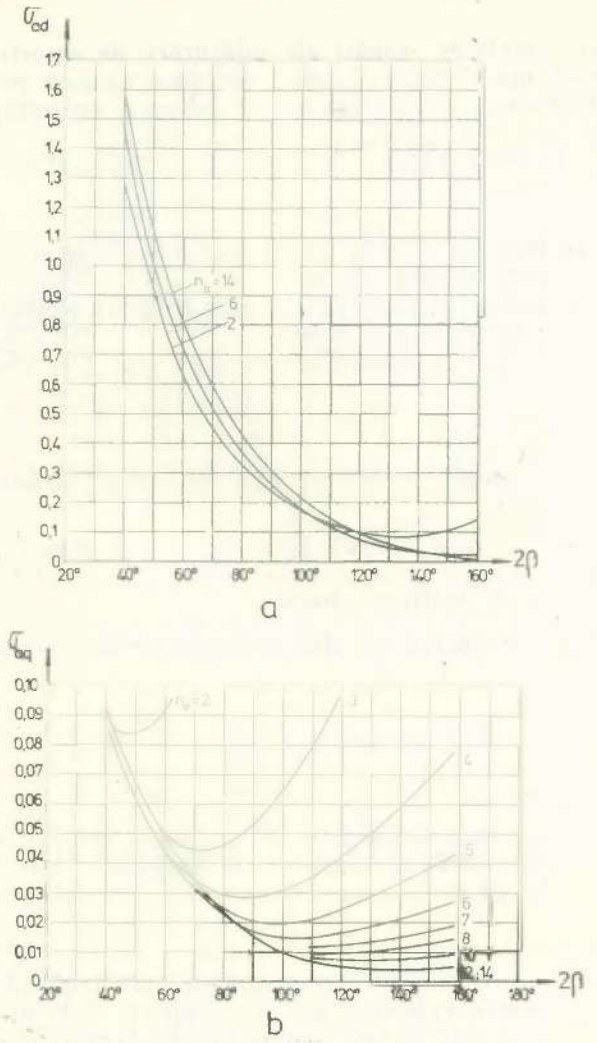


Fig. 1.47 — Curbele coeficienților σ_{ad} și σ_{aq}, în funcție de unghiul 2β și de numărul barelor de amortizare pe pol n_a.

unde :

$\sigma_{ad\,curbe}$, este valoarea lui σ_{ad} luată din curbele din figura 1.47 a, pentru n'_a sau n_a și 2β corespunzător dat de relația (1.168 b) ;

$k_d = \dfrac{\alpha_p\pi + \sin(\alpha_p\pi)}{\pi}$ este coeficientul reacției longitudinale ;

τ — pasul polar, în m.

— Reactanța de scăpări după *axa transversală*, pentru *inele de scurtcircuitare complete*, raportată la stator și în unități relative

$$x_{\sigma q} = \frac{\pi_1 \mu_0 F_a}{\Phi_{1N}} \left[l_{fe2}(\lambda_{ca} + \lambda_{aa}) + \lambda_{fa}\tau C_q \right] \frac{1}{4C_Q} + \sigma_{aq} x_{aq} \text{ [u.r.]} \qquad (1.172)$$

în care :

σ_{aq} este coeficientul scăpărilor suplimentare transversale care se ia din figura 1.47 b, în funcție de n_a și 2β. Pentru mașinile în variantă combinată, σ_{aq} se ia din curbe tot pentru n_a real (nu pentru n'_a), însă la determinarea unghiului 2β corespunzător, în relația (1.168 b) se introduce $n'_a = n_a + 1$.

Semnificația celorlalți termeni este ca în relația (1.171).

Pentru *inele de scurtcircuitare incomplete* (segmente de scurtcircuitare separate pentru fiecare pol) rezultă [9] :

— reactanța de scăpări după axa longitudinală $x_{\sigma d}$, este dată de relația (1.171) ca și pentru inele complete ;

— reactanța de scăpări după axa transversală (din datele experimentale)

$$x_{\sigma q} \approx (1{,}5 \div 2) x_{\sigma d} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.173)$$

1.12. PARAMETRII ȘI CONSTANTELE DE TIMP ALE REGIMULUI TRANZITORIU AL MAȘINII SINCRONE

1.12.1. PARAMETRII ÎN REGIM TRANZITORIU

— Reactanța tranzitorie :

— longitudinală

$$x'_d = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\dfrac{1}{x_{ad}} + \dfrac{1}{x_{\sigma e}}} \text{ [u.r.]} ; \qquad (1.174)$$

— transversală

$$x'_q \approx x_q \text{ [u.r.]}. \qquad (1.174\text{ a})$$

— Reactanța supratranzitorie (pentru mașinile cu înfășurare de amortizare):

— longitudinală

$$x''_d = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}} + \frac{1}{x_{\sigma d}}} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.175)$$

— transversală

$$x''_q = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma q}}} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.175\text{ a})$$

Pentru mașinile fără înfășurare de amortizare

$$x''_d \approx x'_d \text{ [u.r.]}; \qquad (1.176)$$

$$x''_q \approx x'_q \approx x_q \text{ [u.r.]}.$$

— Reactanța inversă, se determină în funcție de valoarea reactanței exterioare pe care funcționează mașina. Astfel:

— în cazul funcționării pe reactanță exterioară mai mare

$$x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2} \text{ [u.r.]}; \qquad (1.177)$$

— în cazul funcționării pe reactanță exterioară mai mică

$$x_2 = \sqrt{x'_d x''_q} \text{ [u.r.]}. \qquad (1.177\text{ a})$$

1.12.2. CONSTANTELE DE TIMP ALE REGIMULUI TRANZITORIU

a. *Constanta de timp* a înfășurării de excitație, considerat ca circuit unic (înfășurarea statorului deschisă, iar înfășurarea de amortizare lipsește)

$$T_e = \frac{x_e}{r_e} \text{ [rad]} \qquad (1.178)$$

sau

$$T_e = \frac{x_e}{\omega r_e} \text{ [s]} \qquad (1.178\text{ a})$$

în care:

$\omega = 2\pi f_1$, este pulsația curentului din indus.

Această constantă de timp determină viteza de creștere a tensiunii înfășurării de excitație.

b. *Constanta de timp* a curenților tranzitorii din stator și rotor sau constanta de timp a înfășurării de excitație, în cazul înfășurării statorului în scurtcircuit și supraconductoare, iar înfășurarea de amortizare longitudinală lipsește

$$T'_d = T_e \frac{x'_d}{x_d} \text{ [s]}. \qquad (1.179)$$

Această constantă determină procesele de reglare a excitației. Totodată această constantă de timp, influențează puternic viteza de amortizare a componentelor pulsatorii ale cuplului de rotație.

c. *Constanta de timp* a înfășurării de amortizare, după axa longitudinală, cînd înfășurarea de excitație este scurtcircuitată iar înfășurarea statorului este deschisă

$$T'_{dd} = \frac{x'_{\sigma d}}{\omega r_d} \text{ [s]} \qquad (1.180)$$

în care:

$$x'_{\sigma d} = x_{\sigma d} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}}} \text{ [u.r.]} \qquad (1.180\text{ a})$$

este reactanța tranzitorie a înfășurării de amortizare longitudinală.

d. *Constanta de timp* a curenților supratranzitorii (cu care se amortizează curenții liberi în înfășurarea de amortizare longitudinală) sau constanta de timp a înfășurării de amortizare după axa longitudinală, cînd ambele înfășurări longitudinale (statorică și de excitație) sînt scurtcircuitate și supraconductoare

$$T''_d = T'_{dd} \frac{x''_d}{x'_d} \text{ [s]}. \qquad (1.181)$$

De valoarea acestei constante de timp, depinde durata componentei supratranzitorii a curentului alternativ din stator.

e. *Constanta de timp* a înfășurării statorului (de amortizare a componentelor aperiodice), cînd înfășurările rotorului sînt scurt-circuitate și supraconductoare

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r_1} \text{ [s].} \qquad (1.182)$$

1.13. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT

Se consideră cazul cînd scurtcircuitul se produce la funcționarea în gol a mașinii, adică $E_0 = U_{1N}$ și $I_1 = 0$.

1.13.1. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT TRIFAZAT SIMETRIC

— Curentul permanent (staționar) de scurtcircuit

$$\underset{\sim}{I}_d = \frac{1}{x_d} \text{ [u.r.] sau } I_d = \underset{\sim}{I}_d I_N = \frac{U_{1N}}{X_d} \text{ [A].} \qquad (1.183)$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit

$$\underset{\sim}{I}'_d = \frac{1}{x'_d} \text{ [u.r.] sau } I'_d = \underset{\sim}{I}'_d I_N = \frac{U_{1N}}{X'_d} \text{ [A].} \qquad (1.183\ a)$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit

$$\underset{\sim}{I}''_d = \frac{1}{x''_d} \text{ [u.r.] sau } I''_d = \underset{\sim}{I}''_d I_N = \frac{U_{1N}}{X''_d} \text{ [A].} \qquad (1.183\ b)$$

OBSERVAȚIE. Valorile, în Ω, ale rezistențelor și reactanțelor cînd se cunosc valorile în unități relative, se obțin din relația (1.79), adică ;

$$r_1 = \frac{R_1}{Z_N} \text{ [u.r.]}$$

unde impedanța nominală este

$$Z_N = \frac{U_{1N}}{I_N} \text{ [Ω].}$$

Rezultă astfel :

$$R_1 = r_1 Z_N = r_1 \frac{U_{1N}}{I_N} \text{ [Ω]} \qquad (1.184)$$

respectiv

$$X_d = x_d Z_N = x_d \frac{U_{1N}}{I_N} \text{ [Ω]} \qquad (1.184\ a)$$

și deci (de exemplu) :

$$I_d = \underset{\sim}{I}_d I_N = \frac{1}{x_d} I_N = \frac{Z_N}{X_d} I_N = \frac{U_{1N}}{X_d I_N} I_N = \frac{U_{1N}}{X_d} \text{ [A].} \qquad (1.184\ b)$$

1.13.2. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT BIFAZAT

— Curentul permanent de scurtcircuit bifazat

$$\underset{\sim}{I}_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{x_d + x_2} \text{ [u.r.] sau } I_{d\,II} = \underset{\sim}{I}_{d\,II} I_N = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{X_d + X_2} \text{ [A].} \qquad (1.185)$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit bifazat

$$\underset{\sim}{I}'_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{x'_d + x_2} \text{ [u.r.] sau } I'_{d\,II} = \underset{\sim}{I}'_{d\,II} I_N = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{X'_d + X_2} \text{ [A].} \qquad (1.185\ a)$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit bifazat

$$\underset{\sim}{I}''_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{x''_d + x_2} \text{ [u.r.] sau } I''_{d\,II} = \underset{\sim}{I}''_{d\,II} I_N = \frac{\sqrt{3} U_{1N}}{X''_d + X_2} \text{ [A].} \qquad (1.185\ b)$$

1.13.3. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT

— Curentul permanent de scurtcircuit monofazat

$$\underset{\sim}{I}_{d\,I} = \frac{3}{x_d + x_2 + x_0} \text{ [u.r.] sau } I_{d\,I} = \underset{\sim}{I}_{d\,I} I_N = \frac{3 U_{1N}}{X_d + X_2 + X_0} \text{ [A].} \qquad (1.186)$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit monofazat

$$\underset{\sim}{I}'_{d\,I} = \frac{3}{x'_d + x_2 + x_0} \text{ [u.r.] sau } I'_{d\,I} = \underset{\sim}{I}'_{d\,I} I_N = \frac{3 U_{1N}}{X'_d + X_2 + X_0} \text{ [A].} \qquad (1.186\ a)$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit monofazat

$$\underset{\sim}{I}''_{d\,I} = \frac{3}{x''_d + x_2 + x_0} \text{ [u.r.] sau } I''_{d\,I} = \underset{\sim}{I}''_{d\,I} I_N = \frac{3 U_{1N}}{X''_d + X_2 + X_0} \text{ [A].} \qquad (1.186\ b)$$

1.13.4. CURENTUL MAXIM DE SCURTCIRCUIT BRUSC (ŞOC)

Valoarea instantanee maximă (amplitudinea) a curentului de scurtcircuit brusc, numit şi „curentul de şoc", se calculează pentru cazul cînd scurtcircuitul se produce în momentul trecerii curentului prin valoarea maximă (tensiunea trece prin zero). Considerînd deasemenea o valoare a tensiunii cu 5% mai mare decît cea nominală rezultă

$$\underset{\sim}{I}_{k\max} = \underset{\sim}{I}_{\text{şoc}} = 1{,}8\,\frac{1{,}05\sqrt{2}}{x_d''}\ [\text{u.r.}] \leqslant 21$$

sau, în A (1.187)

$$I_{\text{şoc}} = \underset{\sim}{I}_{\text{şoc}} I_N = 1{,}8\,\frac{1{,}05\sqrt{2}U_{1N}}{X_d''}\ [\text{A}] \leqslant 21 I_N\ [\text{A}]$$

în care, factorul 1,8 ia în considerare componenta aperiodică a curentului de scurtcircuit brusc după o semiperioadă, componentă care se amortizează cu constanta de timp T_a a statorului determinată cu relaţia (1.182).

Conform STAS 1893-78, valoarea curentului maxim de scurtcircuit brusc nu trebuie să depăşească, pentru maşinile normale, de 21 ori valoarea eficace a curentului nominal (I_N) sau de 15 ori valoarea maximă a curentului nominal ($\sqrt{2}I_N$).

1.13.5. RAPORTUL DE SCURTCIRCUIT

După cum s-a văzut la datele de proiectare ale maşinii sincrone (vezi „Datele funcţionale şi constructive") una din mărimile caracteristice, care poate fi impusă în unele cazuri, este aşa-zisul „raport de scurtcircuit", notat simbolic prin *RSC*.

Fizic, *RSC* reprezintă raportul dintre valoarea curentului de scurtcircuit şi valoarea curentului nominal, adică tocmai curentul de scurtcircuit în unităţi relative.

Dar, curentul de scurtcircuit depinde la rîndul său de valoarea curentului de excitaţie a maşinii. De aceea, în funcţie de curentul de excitaţie, se vor determina două valori distincte ale curentului de scurtcircuit (din indus) şi anume pentru *curentul de excitaţie la funcţionarea în gol* (vezi relaţia (1.155 e)).

$$I_{e0} = \frac{U_{m0N}}{2w_e}\ [\text{A}]$$

şi care se consideră drept *curent de excitaţie de bază*, la care se raportează celelalte valori (deci $\underset{\sim}{I}_{e0} = 1$) şi pentru *curentul de*

excitaţie la funcţionarea în sarcină nominală I_{eN}, determinat cu relaţia (1.155 c).

Deoarece în cazul scurtcircuitului fluxul rezultant este mic, rezultă că trebuie folosită caracteristica magnetică liniară (prelungirea porţiunii rectilinii a caracteristicii magnetice de funcţionare în gol).

Rezultă astfel (fig. 1.48):

— curentul de scurtcircuit, pentru excitaţia la funcţionarea în gol

$$\underset{\sim}{I}_{k0} = \frac{\underset{\sim}{E}_0'}{x_d} = RSC\ [\text{u.r.}]; \qquad (1.188)$$

— curentul de scurtcircuit, pentru excitaţia nominală (la sarcină nominală)

$$\underset{\sim}{I}_{kN} = \frac{\underset{\sim}{E}_0''}{x_d} = \underset{\sim}{I}_{k0}\,\underset{\sim}{I}_{eN}\ [\text{u.r.}]$$

sau, în A (1.188 a)

$$I_{kN} = \underset{\sim}{I}_{kN} I_N\ [\text{A}]$$

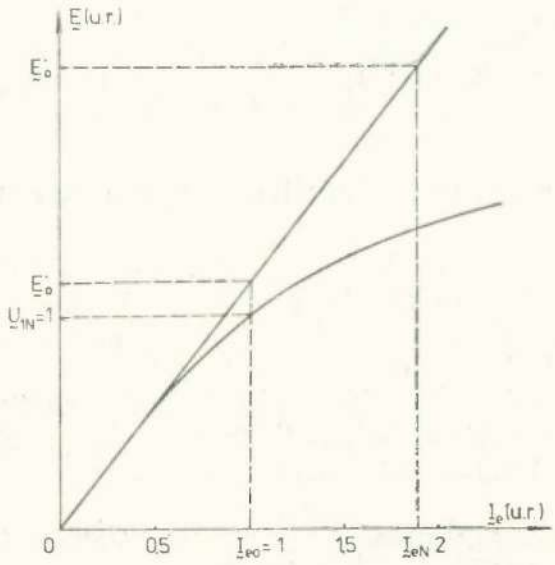


Fig. 1.48 — Determinarea curentului de scurtcircuit, utilizînd caracteristica magnetică la funcţionarea în gol (partea liniară).

în care :

$\underset{\sim}{E}'_o$, $\underset{\sim}{E}''_o$ sînt t.e.m. în unități relative, determinate de pe caracteristica magnetică liniară, pentru curentul de excitație la funcționarea în gol ($\underset{\sim}{I}_{e0} = 1$), respectiv pentru curentul de excitație la funcționarea în sarcină nominală $\underset{\sim}{I}_{eN}$ (în unități relative $\underset{\sim}{I}_{eN} = I_{eN}/I_{e0} = \underset{\sim}{F}_{eN}$ [u.r.]).

Se menționează faptul că în relațiile (1.188) și (1.188 a) trebuie folosită valoarea nesaturată a reactanței sincrone longitudinale, determinată cu relația (1.96) sau (1.103).

OBSERVAȚIE. După cum se știe, se obișnuiește definirea raportului de scurtcircuit ca inversul reactanței sincrone longitudinale, în unități relative, adică

$$RSC = \frac{1}{x_d} \text{ [u.r.]}.$$

Această definiție corespunde de fapt valorii nominale a tensiunii mașinii U_{1N}, nu valorii nominale a t.e.m. E_{1N}.

De aceea RSC determinat conform relației (1.188) este mai mare decît inversul reactanței sincrone longitudinale ($1/x_d$), de k_E ori (pentru $k_E = E_{1N}/U_{1N}$, vezi paragraful 1.1.2).

1.14. CARACTERISTICILE MAȘINII SINCRONE

După cum se știe, calculul electromagnetic are drept scop, ca pe baza datelor nominale și de proiectare, să stabilească mai întîi dimensiunile mașinii apoi performanțele tehnico-economice rezultate, performanțe care trebuie să fie apropiate de cele impuse.

Rezultă deci că, în finalul calculului electromagnetic, trebuie determinate caracteristicile mașinii, ale căror valori ne dau indicații asupra corectitudinii dimensiunilor stabilite.

A. **Căderea de tensiune** $\triangle U$ [%], a fost stabilită în paragraful 1.9.2 cu relațiile (1.146) și (1.150).

B. **Curenții de scurtcircuit** au fost stabiliți mai sus, în paragraful 1.13.

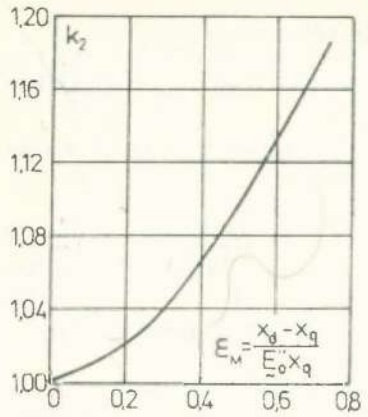


Fig. 1.49 — Valorile coeficientului k_2 în funcție de ε_M.

C. **Capacitatea statică de suprasarcină**

— Pentru mașinile cu *poli aparenți și varianta combinată*

$$k_M = \frac{M_M}{M_N} = \underset{\sim}{M}_M = \frac{\underset{\sim}{E}'_o}{x_d \cos \varphi_N} k_2 = \frac{\underset{\sim}{I}_{eN}}{\cos \varphi_N} k_2 \text{ [u.r.]} \quad (1.189)$$

în care :

k_2, depinde de mărimea $\varepsilon_M = \frac{x_d - x_q}{\underset{\sim}{E}''_o x_q}$ și se ia din figura 1.49.

— Pentru mașinile cu *poli înecați*

$$k_M = \frac{I_{e0}\, \underset{\sim}{I}_{eN}}{\cos \varphi_N} = \frac{\underset{\sim}{I}_{eN}}{\cos \varphi_N} \text{ [u.r.]} \quad (1.189 \text{ a})$$

Valorile lui k_M trebuie să satisfacă limitele impuse prin tema de proiectare.

D. **Cuplul de rotație la scurtcircuit bruse**

În cazul unui scurtcircuit brusc la bornele mașinii, asupra statorului și rotorului acționează un cuplu de rotație mult mai mare decît cuplul nominal. De acesta trebuie ținut cont la calculul mecanic al mașinii.

Valoarea cuplului maxim, în cazul scurtcircuitului brusc trifazat simetric, se determină, ca și valoarea curentului de scurtcircuit brusc, pentru o tensiune majorată cu 5% față de cea nominală, cu relația

$$M_{K3} = \frac{1{,}05^2}{x''_d} M_N \text{ [daNm]} \quad (1.189 \text{ b})$$

unde cuplul nominal M_N este dat de relația

$$M_N = 956 \frac{P_N}{n_1} \text{ [daNm]} \qquad (1.189\ c)$$

în care P_N se introduce în kW (pentru generator se ia S_N, în kVA), iar n_1, în rot/min.

E. **Pierderile și randamentul,** se calculează conform cap. 6 din vol. I (vezi și exemplul de calcul — paragraful 2.13 punctul E).

F. **Caracteristicile externă și de reglaj ale generatoarelor sincrone**

Trasarea caracteristicilor externă și de reglaj, este foarte importantă în special pentru generatoarele sincrone, în vederea alegerii și dimensionării echipamentului de reglaj în cazul funcționării generatorului la diverse regimuri de sarcină, diferite de cel nominal.

Calculul acestor caracteristici ale mașinii sincrone, este destul de dificil din cauza numărului mare de variabile posibile, deoarece pe lîngă variația tensiunii, curentului de sarcină și a curentului de excitație mai pot varia și factorul de putere, reactanțele sincrone datorită saturației magnetice și chiar frecvența. De aceea pentru fiecare caracteristică este necesar a se specifica condițiile în care se consideră că lucrează mașina.

Avînd în vedere deci, numărul mare de variabile, diferențele constructive precum și modul diferit în care reactanțele utile sînt influențate de saturația magnetică, reiese că problema trasării acestor caracteristici trebuie rezolvată în funcție de tipul constructiv al mașinii: cu poli înecați sau cu poli aparenți ori varianta combinată.

a. *Pentru generatoarele cu poli înecați*, ecuația de tensiuni la funcționarea în sarcină, în cazul în care, pentru acoperire, în locul reactanței de scăpări se consideră reactanța Potier X_p, dată, în unități relative, de relația (1.147) este

$$\underline{E}_0 = \underline{U}_1 + R_1\underline{I}_1 + \mathrm{j}X_p\underline{I}_1 + \mathrm{j}X_a\underline{I}_1 \qquad (1.190)$$

în care, X_a reprezintă valoarea nesaturată a reactanței utile, dată, în unități relative, de relația (1.103), în ipoteza unei caracteristici magnetice liniare.

În realitate însă caracteristica magnetică de funcționare în gol nu este liniară, ceea ce conduce la micșorarea reactanței utile cu creșterea gradului de saturație (vezi paragraful 1.16.1).

Rezultă astfel că în ecuația dată de relația (1.190), este rațional să se considere valoarea saturată a reactanței utile X_{as}, valoare variabilă cu punctul de funcționare de pe caracteristica magnetică a mașinii, adică

$$\underline{E}_{0s} = \underline{U}_1 + R_1\underline{I}_1 + \mathrm{j}X_p\underline{I}_1 + \mathrm{j}X_{as}\underline{I}_1 \qquad (1.190\ a)$$

și în care mărimile pot fi exprimate fie în valori absolute (ca mai sus), fie în unități relative cum se va proceda în continuare.

Pentru mai multă claritate, cît și pentru simplificarea anumitor referiri, se vor adopta pentru diverse moduri de a considera caracteristicile magnetice de funcționare în gol, următoarele denumiri (vezi fig. 1.50 a):

— caracteristica *reală* de funcționare în gol (1), care corespunde condițiilor reale de magnetizare a mașinii;

— caracteristica *liniară* de funcționare în gol (2), care este tangenta în origine la caracteristica magnetică reală și corespunde cazului în care se consideră mașina nesaturată, adică permeabilitatea magnetică a fierului se presupune infinită;

— caracteristica *liniarizată* de funcționare în gol (3), corespunzătoare fiecărui punct de pe caracteristica reală, adică permeabilitatea fierului se presupune nu infinită, ci constantă dar pentru un anumit punct considerat.

Cum se observă, din figura 1.50 a, fiecărui punct de pe caracteristica reală $\underline{E}_{1(1)}$, $\underline{E}_{1(2)}$, ..., îi corespunde cîte o valoare pe caracteristica liniară notate cu semnul ('), adică $\underline{E}'_{0(1)}$, $\underline{E}'_{0(2)}$, ... și cu $\underline{E}''_0$ pentru curentul de excitație $\underline{I}_e \neq \underline{I}_{e0}$ și cîte o valoare pe caracteristicile liniarizate pentru curentul de excitație $\underline{I}_e$ considerat, notate cu $\underline{E}_{0s(1)}$, $\underline{E}_{0s(2)}$, ..., valoare care caracterizează gradul de saturație al punctului respectiv. Corelarea acestor notații de pe caracteristicile de funcționare în gol definite mai sus, și diagrama fazorială a ecuației de tensiuni (diagrama Potier), este indicată în figura 1.50 b.

Reiese deci, că fiecărei stări de magnetizare a mașinii, îi corespunde o anumită valoare pentru reactanța utilă saturată x_{as}.

Cum starea de magnetizare la funcționarea în sarcină este dată de t.e.m. rezultantă $\underline{E}_1$, a punctului respectiv de pe caracteristica reală de funcționare în gol căreia îi corespunde tensiunea la borne $\underline{U}_1$, rezultă că reactanța utilă saturată x_{as} a acelui punct, se obține prin înmulțirea reactanței utile nesaturată x_a cu raportul $\underline{E}_{1(i)}/\underline{E}'_{0(i)}$ (i = 1, 2, 3, ...).

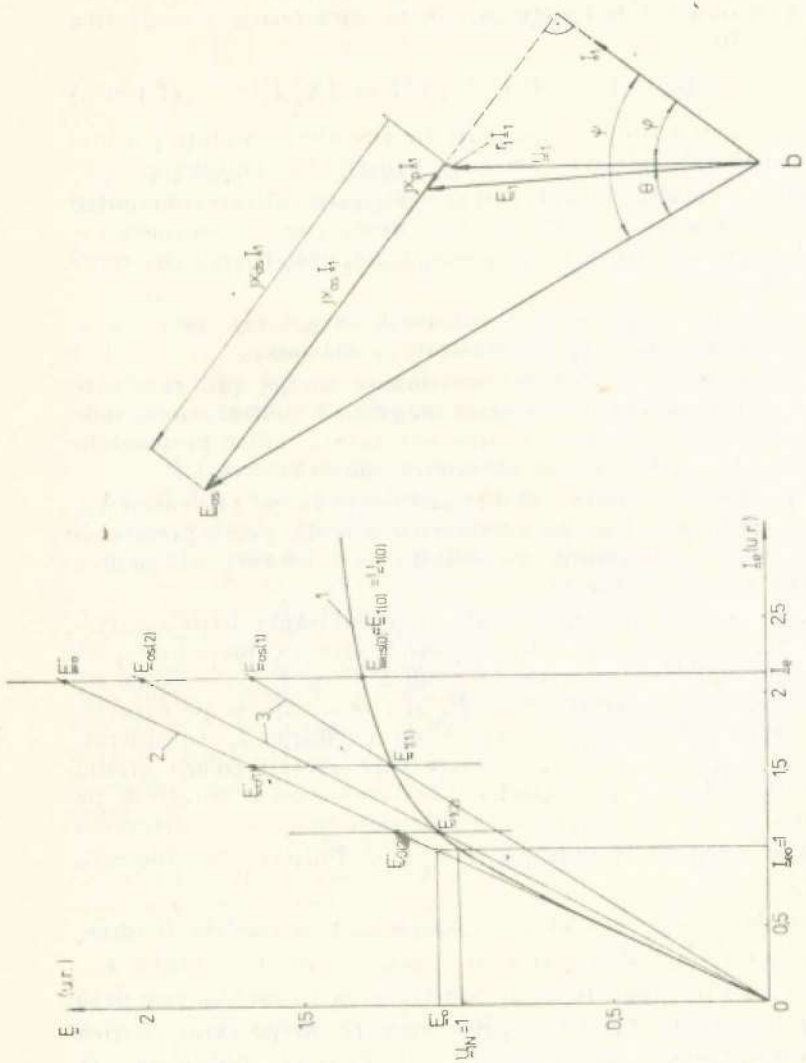


Fig. 1.50 — Explicativă la determinarea caracteristicilor externă și de reglaj ale generatorului sincron cu poli înecați :
a — caracteristicile magnetice ; b — diagrama fazorială reală (cu influența saturației magnetice) ; 1 — caracteristică magnetică reală de funcționare în gol ; 2 — caracteristica magnetică liniară ; 3 — caracteristici magnetice liniarizate.

Din diagrama Potier (fig. 1.50 b) rezultă, pentru mărimile în unități relative

$$\underset{\sim}{E}_1^2 = (\underset{\sim}{U}_1 \sin \varphi + x_p \underset{\sim}{I}_1)^2 + (\underset{\sim}{U}_1 \cos \varphi + r_1 \underset{\sim}{I}_1)^2 =$$

$$= \underset{\sim}{U}_1^2 + 2\underset{\sim}{U}_1 \underset{\sim}{I}_1 (x_p \sin \varphi + r_1 \cos \varphi) + \underset{\sim}{I}_1^2 x_p^2 ; \qquad (1.190\ b)$$

$$\underset{\sim}{E}_{0s}^2 = (\underset{\sim}{U}_1 \sin \varphi + \underset{\sim}{I}_1 x_{ds})^2 + (\underset{\sim}{U}_1 \cos \varphi + \underset{\sim}{I}_1 r_1)^2 =$$

$$= \underset{\sim}{U}_1^2 + 2\underset{\sim}{U}_1 \underset{\sim}{I}_1 (x_{ds} \sin \varphi + r_1 \cos \varphi) + \underset{\sim}{I}_1^2 x_{ds}^2$$

în care :

$$x_{ds} = x_{as} + x_p$$

unde

$x_{as} = x_a \dfrac{\underset{\sim}{E}_{1(i)}}{\underset{\sim}{E}'_{0(i)}}$ este reactanța utilă saturată corespunzătoare punctului i = 1, 2, ..., de pe caracteristica reală. (1.190 c)

Din figura 1.50 a rezultă, de asemenea, relațiile (pentru punctul i = 1, 2, ...), cu mărimile în unități relative :

$$\underset{\sim}{E}_{0s(i)} = \underset{\sim}{E}''_0 \frac{\underset{\sim}{E}_{1(i)}}{\underset{\sim}{E}'_{0(i)}} \text{ iar } \underset{\sim}{E}''_0 = \underset{\sim}{E}'_0 \frac{\underset{\sim}{I}_r}{\underset{\sim}{I}_{r0}} . \qquad (1.190\ d)$$

Cu relațiile (1.190 b) sau grafic executînd diagrama tensiunilor pentru fiecare punct se pot determina, punct cu punct, caracteristicile externă și de reglaj ale generatorului sincron cu poli înecați.

Se reamintește faptul că în cazul cînd mărimile se iau în unități relative, mărimile de bază la care se raportează acestea sînt : U_{1N}, I_{1N} și I_{r0} (sau U_{m0N}, pentru tensiunea nominală U_{1N}).

Caracteristica externă, adică $U_1 = f(I_1)$, pentru I_r = constant cos $\varphi > 0$ și constant ; f_1 = constant.

Aceasta înseamnează a se stabili valorile tensiunii la borne U_1 în funcție de curentul de sarcină I_1, pentru un curent de excitație constant, care poate fi cel nominal sau un oricare altul, la un factor de putere constant care, de asemenea, poate fi cel nominal sau un altul, în cazul păstrării turației (frecvenței) constante.

Pentru ușurarea rezolvării sistemului reprezentat de relațiile (1.190 b), considerînd $\underset{\sim}{U}_1 = z\underset{\sim}{I}_1$, în care prin z se înțelege modulul impedanței de sarcină, se fac următoarele notații :

$$u = \frac{\underset{\sim}{E}_1}{\underset{\sim}{E}_{0s}} ;$$

$$s = 1 - u^2 ;$$

$$p = (u^2 x_{ds} - x_p) \sin \varphi - s r_1 \cos \varphi ; \qquad (1.191)$$

$$q = u^2 z_{ds}^2 - z_p^2$$

unde :

$$z_{ds}^2 = x_{ds}^2 + r_1^2 ;$$

$$z_p^2 = x_p^2 + r_1^2 .$$

Se obține astfel [13] :

— impedanța de sarcină

$$z = \frac{p + \sqrt{p^2 + sq}}{s} \text{ [u.r.]} ; \qquad (1.191 \text{ a})$$

— curentul de sarcină, din stator

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1}{\sqrt{z^2 + 2z(x_p \sin \varphi + r_1 \cos \varphi) + x_p^2}} \text{ [u.r.]} ; \qquad (1.191 \text{ b})$$

— tensiunea la bornele generatorului (de fază)

$$\underline{U}_1 = z\underline{I}_1 \text{ [u.r.]}. \qquad (1.191 \text{ c})$$

Etapele de lucru sînt următoarele (fig. 1.50) :

— se trasează caracteristica magnetică reală (1) de funcționare în gol, $\underline{E}_0 = f(\underline{I}_e)$ în unități relative ;

— se trasează dreapta $\underline{I}_e$ = constant, pentru curentul de excitație dorit, exprimat în unități relative ($\underline{I}_e = I_e / I_{e0}$). Pentru regimul nominal $\underline{I}_e = \underline{I}_{eN}$. ;

— se trasează caracteristica liniară (2), tangentă la porțiunea liniară a caracteristicii magnetice reale de funcționare în gol, pînă întîlnește verticala $\underline{I}_e$ = constant, în punctul $\underline{E}_0''$;

— se aleg, în mod arbitrar, cîteva puncte $\underline{E}_{1(1)}$, $\underline{E}_{1(2)}$, ... pe caracteristica reală de funcționare în gol, determinîndu-se valorile corespunzătoare de pe caracteristica liniară, de funcționare în gol $\underline{E}'_{0(1)}$, $\underline{E}'_{0(2)}$, ... Se duc de asemenea și caracteristicile liniarizate (3) de funcționare în gol, rezultînd punctele $\underline{E}_{0s(1)}$, $\underline{E}_{0s(2)}$, ... :

— se determină reactanțele utile și sincrone saturate, corespunzătoare fiecărui punct :

$$x_{as(1)} = x_a \frac{\underline{E}_{1(1)}}{\underline{E}'_{0(1)}} \text{ și } x_{ds(1)} = x_{as(1)} + x_p \text{ [u.r.]} ;$$

$$x_{as(2)} = x_a \frac{\underline{E}_{1(2)}}{\underline{E}'_{0(2)}} \text{ și } x_{ds(2)} = x_{as(2)} + x_p \text{ [u.r.] etc.;} \qquad (1.191 \text{ d})$$

— se calculează mărimile notate în relațiile (1.191), cu ajutorul cărora cu relația (1.191 a) rezultă impedanța de sarcină z. Cu relațiile (1.191 b și c) se determină apoi valorile curentului $\underline{I}_{1(i)}$

și tensiunii $\underline{U}_{1(i)}$ (i = 1, 2, ...), corespunzătoare fiecărui punct $\underline{E}_{1(1)}$, $\underline{E}_{1(2)}$, ... ales pe caracteristica reală și pentru curentul de excitație $\underline{I}_e$ = constant stabilit.

Rezultă astfel caracteristica externă, în unități relative $\underline{U}_1 = f(\underline{I}_1)$, reprezentată, pentru exemplul de calcul, în figura 2.14.

Punctele extreme ale caracteristicii externe sînt :

— punctul de funcționare în gol, pentru $\underline{I}_1 = 0$, căruia îi corespunde tensiunea $\underline{U}_{1(0)} = \underline{E}_{0s(0)}$ la intersecția dreptei $\underline{I}_e$ = constant cu caracteristica reală de funcționare în gol ;

— punctul de funcționare în scurtcircuit permanent trifazat, pentru $\underline{U}_1 = 0$, căruia îi corespunde curentul de scurtcircuit trifazat, determinat cu relația (1.188 a) dar pentru curentul de excitație $\underline{I}_e$ considerat (pentru care se trasează caracteristica externă).

Se poate proceda la trasarea caracteristicii externe, pentru diferite valori atît ale curentului de excitație cît și ale factorului de putere.

Caracteristica de reglaj, adică $I_e = f(I_1)$, pentru U_1 = constant ; cos φ = constant și φ > 0 ; f_1 = constant.

Aceasta înseamnă a se determina curentul de excitație necesar I_e pentru diferiți curenți de sarcină I_1, în condițiile menținerii tensiunii la borne U_1, factorului de putere și turației (frecvenței) constante, care pot fi cele nominale sau altele.

Etapele de lucru sînt următoarele (fig. 1.50, deoarece se folosesc aceleași caracteristici magnetice) :

— se impune curentul de sarcină $\underline{I}_1$ (valorile lui $\underline{U}_1$ și cos φ fiind stabilite și menținute constante) ;

— se determină cu relațiile (1.190 b) — din prima ecuație — t.e.m. rezultantă $\underline{E}_1$, căreia îi corespunde un punct pe caracteristica reală de funcționare în gol (de exemplu punctul $\underline{E}_{1(1)}$) ; pentru acest punct, pe caracteristica liniară (nesaturată), rezultă $\underline{E}'_{0(1)}$;

— se calculează cu relațiile (1.191 d), valoarea saturată a reacției utile și sincrone ;

— se determină cu relațiile (1.190 b) — din a doua ecuație — t.e.m. $\underline{E}_{0s}$ (de exemplu $\underline{E}_{0s(1)}$, corespunzător lui $\underline{E}_{1(1)}$ presupus mai sus) ;

— cu relațiile (1.190 c) se determină mai întîi t.e.m. $\underline{E}_0''$, corespunzătoare caracteristicii magnetice liniare, adică fără saturație (pentru exemplificare, se consideră, ca mai sus, valorile punc-

tului 1) și apoi curentul de excitație $\underset{\sim}{I}_e$, corespunzător curentului de sarcină $\underset{\sim}{I}_1$ impus, adică :

$$\left.\begin{aligned} \underset{\sim}{E}_0'' &= \underset{\sim}{E}_{0s(1)} \frac{\underset{\sim}{E}_{0(1)}'}{\underset{\sim}{E}_{1(1)}} \text{ [u.r.]} \\ \underset{\sim}{I}_e &= \underset{\sim}{I}_{e0} \frac{\underset{\sim}{E}_0''}{\underset{\sim}{E}_0'} = \frac{\underset{\sim}{E}_0''}{\underset{\sim}{E}_0'} \text{ [u.r.]} \end{aligned}\right\} \qquad (1.191\ e)$$

în care $\underset{\sim}{E}_0'$ este valoarea t.e.m. luată de pe caracteristica liniară (tangentă în origine la caracteristica reală), pentru curentul de excitație de bază $\underset{\sim}{I}_{e0}$ (în unități relative $\underset{\sim}{I}_{e0} = 1$), căruia pe caracteristica reală îi corespunde $\underset{\sim}{U}_{1N} = 1$. Pentru prima valoare impusă a curentului $\underset{\sim}{I}_1$, adică $\underset{\sim}{I}_{1(1)}$ al punctului 1 considerat, curentul de excitație rezultat va fi $\underset{\sim}{I}_{e(1)}$.

Se procedează similar pentru mai multe valori impuse lui $\underset{\sim}{I}_1$ (deci mai multe puncte), rezultînd astfel caracteristica de reglaj a generatorului $\underset{\sim}{I}_e = f(\underset{\sim}{I}_1)$ reprezentată, pentru exemplul de calcul, în figura 2.15.

Mărimile, în unități absolute se obțin prin înmulțirea valorilor în unități relative cu valorile mărimilor de bază : U_{1N}, I_{1N} și I_{e0} (pentru U_{1N}).

OBSERVAȚII. 1. Pentru mașinile cu $S_N > 50$ kVA, la care $r_1 \ll x_p$, se poate considera $r_1 \approx 0$, ceea ce simplifică relațiile de calcul.

2. Deoarece trasarea punct cu punct a caracteristicilor externă și de reglaj, necesită un volum mare de muncă, se pot utiliza calculatoarele electronice.

b. *Pentru generatoarele sincrone cu poli aparenți și varianta combinată*, ecuația de tensiuni la funcționarea în sarcină este

$$\underset{\sim}{E}_0 = \underset{\sim}{U}_1 + R_1\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}X_{\sigma 1}\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}X_{aq}\underset{\sim}{I}_q + \mathrm{j}X_{ad}\underset{\sim}{I}_d =$$

$$= \underset{\sim}{U}_1 + R_1\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}X_{\sigma 1}\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}X_{aq}\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}(X_{ad} - X_{aq})\underset{\sim}{I}_d \qquad (1.191\ f)$$

deoarece

$$\underset{\sim}{I}_q = \underset{\sim}{I}_1 - \underset{\sim}{I}_d$$

și în care reactanțele utile X_{ad} și X_{aq} sînt nesaturate.

Reprezentarea fazorială a acestei ecuații este indicată în figura 1.28 a.

Dacă se ia în considerare influența saturației magnetice, în special asupra reactanțelor utile X_{ad} și X_{aq} și dacă se are în vedere că (vezi și relațiile (1.104) și (1.104 a))

$$X_{ad} - X_{aq} = X_d - X_q$$

atunci ecuația de tensiuni este

$$E_{0s} = \underset{\sim}{U}_1 + R_1\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}X_{qs}\underset{\sim}{I}_1 + \mathrm{j}(X_{ds} - X_{qs})\underset{\sim}{I}_1 \qquad (1.191\ g)$$

în care, reactanțele sincrone saturate, după cele două axe sînt

$$X_{ds} = X_{ads} + X_{\sigma 1} ;$$

$$X_{qs} = X_{aqs} + X_{\sigma 1}$$

iar valorile saturate ale reactanțelor utile, după cele două axe X_{ads} și X_{aqs} se determină ca în paragraful 1.16.1, punctul 2, cu relațiile (1.212) și respectiv (1.212 a), adică (se consideră valorile în unități relative) :

$$x_{ads} = k_{sd}x_{ad} \text{ [u.r.]} ;$$

$$x_{aqs} = k_{sq}x_{aq} \text{ [u.r.]}.$$

Ca și în cazul *a*, al mașinilor cu poli înecați, se constată că fiecărui punct de pe caracteristica magnetică reală de funcționare în gol, îi corespunde cîte o valoare saturată a reactanțelor utile, dictată de coeficienții k_{sd} și k_{sq}.

Dar, conform figurii 1.37 b, coeficienții k_{sd} și k_{sq} ai punctului considerat pe caracteristica magnetică reală, depind de raportul $\underset{\sim}{U}'_{m\delta d j1}/\underset{\sim}{U}'_{m\delta}$ al punctului respectiv, adică de t.e.m. rezultantă $\underset{\sim}{E}_1$ a lui (vezi fig. 1.38).

Rezultă deci, că în cazul generatoarelor cu poli aparenți și varianta combinată, este necesară și caracteristica magnetică parțială $\underset{\sim}{\Phi}$ (sau $\underset{\sim}{E}$) $= f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d j1})$ cu ajutorul căreia și a caracteristicii liniare, se determină, pentru $\underset{\sim}{E}_1$, raportul $U'_{m\delta d j1}/U'_{m\delta}$ și deci (din fig. 1.37 a) coeficienții k_{sd} și k_{sq}.

Din diagrama fazorială, reprezentată în figura 1.28 a (cu mențiunea că pentru valorile saturate ale reactanțelor utile cores-

punde t.e.m. $E_{\sigma s}$, similar ca în figura 1.50 b), pentru mărimile în unități relative, rezultă :

$$E_1^2 = (U_1 \sin \varphi + x_{\sigma 1} I_1)^2 + (U_1 \cos \varphi + r_1 I_1)^2 ;$$

$$E_{\sigma s} = \frac{U_1 \cos \varphi + r_1 I_1}{\cos \psi} + (x_{ds} - x_{qs}) I_1 \sin \psi ; \quad (1.191\ h)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{U_1 \sin \varphi + x_{\sigma s} I_1}{U_1 \cos \varphi + r_1 I_1}.$$

O rezolvare obișnuită a acestui sistem, în raport cu U_1 și I_1 este extrem de dificilă, ea neputînd fi efectuată decît cu calculatorul electronic care trebuie să caute perechile de valori numerice ale lui U_1 și I_1, ce satisfac aceste relații, pentru anumite valori ale parametrilor și mărimilor folosite.

De asemenea determinarea lui $E_{\sigma s}$, similar ca la polii înecați, de pe caracteristica liniarizată, reprezintă o oarecare aproximație datorită modului diferit de influențare reciprocă dintre cîmpul transversal și cel longitudinal la generatoarele cu poli aparenți și varianta combinată.

De aceea, în practica de proiectare, în special pentru valori mici ale factorului de putere, metoda de trasare a caracteristicilor externă și de reglaj prezentată la generatorul cu poli înecați (cazul *a* de mai sus), se utilizează și la cel cu poli aparenți și varianta combinată, în locul reactanței utile x_a, luîndu-se însă reactanța utilă după axa longitudinală x_{ad}, caracteristicile obținute astfel fiind destul de apropiate de cele reale, chiar, pentru valorile obișnuite ale factorului de putere ($\cos \varphi \leqslant 0{,}8$).

c. *Caracteristica externă reglată, a generatoarelor sincrone*

La anumite grupuri electrogene și în special la cele utilizate în tracțiunea Diesel electrică, unde generatorul sincron alimentează motoarele de curent continuu prin intermediul unor redresoare, acționarea grupului se face la putere constantă fără a se impune însă o tensiune constantă la bornele generatorului.

În acest caz prezintă interes trasarea caracteristicilor externă și de reglaj pentru putere constantă dar la tensiune și curent variabile.

Caracteristica externă, în condițiile menționate și la $\cos \varphi =$ = constant, este o hiperbolă dată de relația

$$P = mU_1 I_1 \cos \varphi = kU_1 I_1 = \text{constant}. \quad (1.191\ i)$$

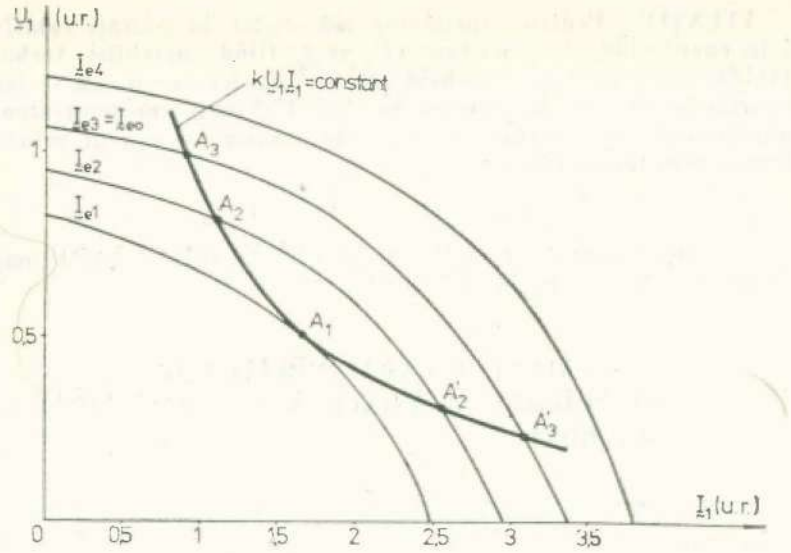


Fig. 1.51 — Explicativă la determinarea „caracteristicii externe reglate".

În asemenea situații, problema care se pune este aceea de a determina curentul de excitație necesar pentru fiecare tensiune, astfel încît să se obțină curentul de sarcină rezultat din relația (1.191 i) la puterea constantă dată.

O astfel de caracteristică numită *caracteristică externă reglată* se poate obține pe două căi :

— se trasează mai multe caracteristici externe $U_1 = f(I_1)$ pentru diverși curenți de excitație I_{e1}, I_{e2} etc. (fig. 1.51). Peste aceste caracteristici se suprapune apoi hiperbola $kU_1 I_1 =$ constant dată de relația (1.191 i). Punctele A_1, A_2, A'_2, A_3, A'_3 etc., de intersecție ale acestei hiperbole cu caracteristicile externe pentru diverși curenți de excitație I_e, reprezintă tocmai curenții de excitație necesari obținerii tensiunii și curentului de sarcină, ai punctului respectiv, la puterea constantă P, dată ;

— se aplică procedeul expus mai sus la caracteristica de reglaj, determinînd curentul de excitație pentru fiecare punct corespunzător cîte unei perechi de valori U_1 și I_1 rezultate din relația (1.191 i) : punctele sînt precizate prin alegerea diferitelor valori, de exemplu, pentru curentul de sarcină I_1.

ATENȚIE ! Pentru exprimarea mărimilor în unități relative și în cazul cînd P = constant (U_1 și I_1 fiind variabile), trebuie stabilite *valorile de bază* (considerate nominale) la care să se facă raportările. De regulă, acestea se consideră cele corespunzătoare funcționării generatorului la tensiune maximă și curent minim, impuse prin temă, adică :

$$U_{1N} = U_{1\max}\,;\quad I_{1N} = I_{1\min}\,;$$

I_{e0}, este curentul de excitație, luat de pe caracteristica magnetică de funcționare în gol, pentru $U_{1N} = U_{1\max}$.

1.15. CALCULUL CARACTERISTICILOR DE PORNIRE ÎN ASINCRON ALE MOTOARELOR SINCRONE

După cum se știe, motoarele sincrone prevăzute cu colivie de pornire au în axa longitudinală două înfășurări (cea de excitație și cea de pornire sau de amortizare longitudinală), iar în axa transversală numai o înfășurare (cea de pornire sau de amortizare transversală).

În timpul pornirii în asincron înfășurarea de excitație este conectată pe o rezistență de descărcare de aproximativ 10 ori mai mare decît rezistența proprie (vezi relația (1.161) în care $k_{de} = 10$), pentru ca valoarea cuplului monoaxial să fie mult diminuată, ceea ce face ca șaua caracteristicii de pornire să nu conducă la pericolul „agățării" motorului la o turație $n \approx 0{,}5n_1$, pericol care este cel mai mare cînd înfășurarea de excitație este scurtcircuitată (fig. 1.52).

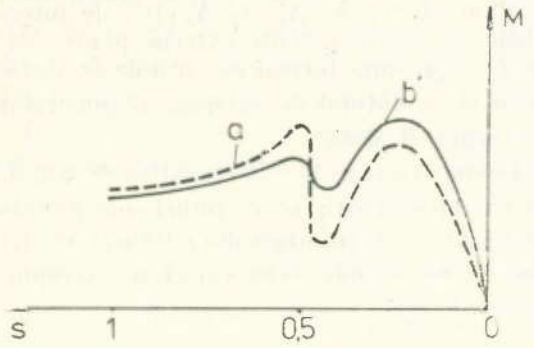


Fig. 1.52 — Caracteristica cuplului la pornirea în asincron a motorului sincron : a — cu înfășurarea de excitație în scurtcircuit; b — cu înfășurarea de excitație conectată pe o rezistență de descărcare de 10 ori *rezistența* proprie.

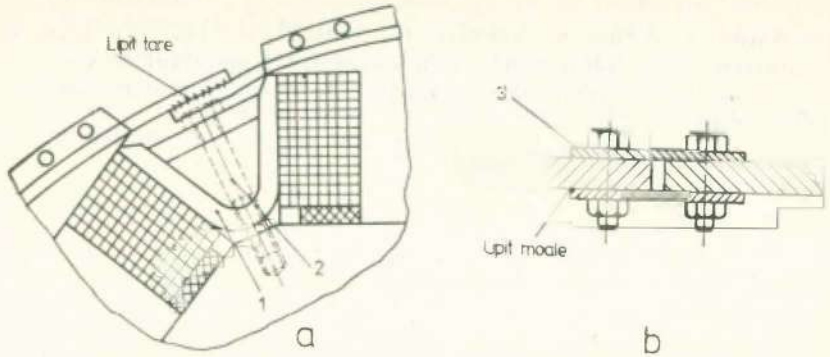


Fig. 1.53 — Consolidarea bobinelor polare la mașinile sincrone cu poli aparenți și înserierea segmentelor de scurtcircuitare prin suprapunere și lipitură tare (a) sau cu plăci speciale prinse cu șuruburi și lipite (b) : 1 — piesă de consolidare a bobinelor ; 2 — șurub de fixare a piesei de consolidare ; 3 — plăci speciale din cupru.

Dacă s-ar lăsa înfășurarea de excitație deschisă, atunci ar exista pericolul străpungerii izolației din cauza t.e.m. mari indusă în aceasta. De asemenea, tot în scopul îmbunătățirii caracteristicilor de pornire, este indicat ca *inelele de scurtcircuitare* al barelor de amortizare (pornire) *să fie complete* (segmentele de scurtcircuitare ale polilor se lipesc între ele — fig. 1.53). În caz contrar, al *inelelor incomplete* (segmentele neunite între ele), valorile parametrilor după axa transversală sînt mult diferite (vezi relațiile (1.170) și (1.173), conducînd la caracteristici de pornire necorespunzătoare (cu pericolul „agățării" la $0{,}5n_1$, pronunțat).

Funcționarea asincronă a mașinii sincrone reprezintă de fapt funcționarea unei mașini asincrone cu circuitul secundar dezechilibrat electromagnetic, problemă care este tratată în cadrul studiului regimurilor de funcționare ale mașinii asincrone [9]. Toate fenomenele rămîn aceleași și în cazul de față.

Utilizînd teoria dublei reacții a mașinii sincrone, au fost stabilite relații de calcul relativ simple pentru cupluri și curenți, valabile pentru diferite tipuri de mașini sincrone : cu poli aparenți, cu rotorul în variantă combinată și cu poli înecați [9], [10].

În cele ce urmează, pentru o mai ușoară înțelegere a fenomenelor fizice corespunzătoare regimului de pornire în asincron a motorului sincron, se vor expune pe scurt, principalele etape de determinare a mărimilor care interesează.

Astfel, așa cum s-a menționat, pentru calculul curenților și cuplurilor se va folosi teoria dublei reacții (în sistemul de coordonate d, q, 0), în cadrul căreia ecuațiile de bază, în mărimi instantanee, sînt :

$$u_d = R_1 i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \psi_q \frac{d\gamma}{dt};$$

$$u_q = R_1 i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\gamma}{dt};$$

$$u_0 = R_1 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt};$$

$$u_e = R_e i_e + \frac{d\psi_e}{dt}; \qquad (1.192)$$

$$0 = R_d i_{Dd} + \frac{d\psi_{Dd}}{dt};$$

$$0 = R_q i_{Dq} + \frac{d\psi_{Dq}}{dt}$$

unde, indicele D se referă la înfășurarea de amortizare, iar $\frac{d\gamma}{dt} = \omega_r$ reprezintă valoarea medie a vitezei unghiulare.

În ecuațiile prezentate de relațiile (1.192) s-a utilizat convenția de asociere a sensurilor pentru receptor (motor).

Fluxurile totale, care intervin în ecuații, au o componentă utilă și una de scăpări. Fluxul util care înlănțuie cele trei înfășurări din axa longitudinală nu are în general aceeași valoare pentru fiecare înfășurare. În cazul de față se va admite că fluxul magnetic util comun înfășurărilor, este fluxul magnetic din întrefier. Atunci, avînd în vedere că toate înfășurările se presupun cu același număr de spire și același factor de înfășurare cu al statorului (raportate la înfășurarea statorului), urmează că inductanțele utile ale înfășurărilor reale și raportate, în axele d și q sînt egale, adică :

$$L_{ad} = L_{cu} = L_{Ddu};$$
$$L_{aq} = L_{Dqu}. \qquad (1.192\ a)$$

În această situație se poate scrie :

$$\psi_d = L_\sigma i_d + L_{ad}(i_d + i_{Dd} + i_e);$$
$$\psi_q = L_\sigma i_q + L_{aq}(i_q + i_{Dq}). \qquad (1.192\ b)$$

În continuare, se va presupune că în perioada pornirii, nu se aplică tensiune la bornele înfășurării de excitație, iar aceasta este scurtcircuitată sau, cazul real, închisă pe o impedanță (de exemplu o rezistență de 10 ori rezistența proprie).

Se va presupune de asemenea că mașina este alimentată de la un sistem simetric de tensiuni :

$$u_a = \sqrt{2}U \sin \omega t;$$
$$u_b = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \qquad (1.193)$$
$$u_c = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

iar, dacă poziția rotorului este definită prin unghiul

$$\gamma = -(1-s)\omega t + \gamma_0$$

atunci, viteza unghiulară medie are valoarea

$$\omega_r = \frac{d\gamma}{dt} = -(1-s)\omega.$$

Aplicînd relațiile de legătură dintre mărimile corespunzătoare sistemului de coordonate a, b, c și d, q, 0

$$u_d = \frac{2}{3}\left[u_a \cos\gamma + u_b \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \cos\left(\gamma + \frac{4\pi}{3}\right)\right]; \qquad (1.193\ a)$$

$$u_q = \frac{2}{3}\left[u_a \sin\gamma + u_b \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) + u_c \sin\left(\gamma + \frac{4\pi}{3}\right)\right]$$

se obține :

$$u_d = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \gamma) = \sqrt{2}U \sin(s\omega t + \gamma_0); \qquad (1.193\ b)$$

$$u_q = -\sqrt{2}U \cos(\omega t + \gamma) = -\sqrt{2}U \cos(s\omega t + \gamma_0);$$

$$u_0 = 0$$

sau

$$u_d = \mathrm{Im}\left\{\sqrt{2}\,\dot{U} e^{j(s\omega t + \gamma_0)}\right\} = \mathrm{Im}\ \dot{U}; \qquad (1.193\ c)$$

$$u_q = \mathrm{Im}\left\{-j\sqrt{2}\,\dot{U} e^{j(s\omega t + \gamma_0)}\right\} = \mathrm{Im}\,(-j\dot{U})$$

unde, $\dot{U}$ reprezintă valoarea în complex nesimplificat a tensiunii.

Deci, introducînd mărimea $\underline{U}$, scrisă în complex simplificat, se obține:

$$u_d = \mathrm{Im}\left\{\underline{U}\sqrt{2}e^{js\omega t}\right\};$$
$$u_q = \mathrm{Im}\left\{(-j\underline{U})\sqrt{2}e^{js\omega t}\right\}; \qquad (1.193\ d)$$
$$u_0 = 0.$$

Toate mărimile ψ_d, ψ_q și i_d, i_q sînt, în cazul de față, considerate mărimi sinusoidal variabile în timp.

Dacă în relațiile (1.192) elementul de derivare se va înlocui cu $js\omega$ la mărimile de pulsația $s\omega$, și cu $j\omega$ la cele de pulsația ω, atunci aceste relații devin:

$$\underline{U} = R_1\underline{I}_d + js\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d - (1-s)\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_q;$$

$$-j\underline{U} = R_1\underline{I}_q + js\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_q + (1-s)\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d;$$

$$0 = R_1\underline{I}_0 + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_0; \qquad (1.194)$$

$$0 = R_e\underline{I}_e + js\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_e;$$

$$0 = R_d\underline{I}_{Dd} + js\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{Dd};$$

$$0 = R_q\underline{I}_{Dq} + js\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{Dq}.$$

Dar, în baza relațiilor (1.192 b), la pulsația ω se obține:

$$j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d = jX_\sigma\underline{I}_d + jX_{ad}(\underline{I}_d + \underline{I}_{Dd} + \underline{I}_e); \qquad (1.194\ a)$$

$$j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_q = jX_\sigma\underline{I}_q + jX_{aq}(\underline{I}_q + \underline{I}_{Dq}).$$

Dacă în relațiile (1.194) înmulțim ecuația a doua cu j și o adunăm, apoi o scădem din prima ecuație, se obține:

$$2\underline{U} = R_1(\underline{I}_d + j\underline{I}_q) + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}(j\underline{\psi}_q); \qquad (1.194\ b)$$

$$0 = R_1(\underline{I}_d - j\underline{I}_q) + j(2s-1)\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d - j(2s-1)\frac{\omega}{\sqrt{2}}(j\underline{\psi}_q).$$

Ecuațiile dată de relațiile (1.194 b) și ultimele trei ecuații din relațiile (1.194) dau sistemul de ecuații:

$$\underline{U} = R_1\frac{1}{2}(\underline{I}_d + j\underline{I}_q) + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\frac{1}{2}\underline{\psi}_d + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\frac{1}{2}(j\underline{\psi}_q);$$

$$0 = R_1\frac{1}{2}(\underline{I}_d - j\underline{I}_q) + j(2s-1)\frac{\omega}{\sqrt{2}}\frac{1}{2}\underline{\psi}_d -$$

$$-j(2s-1)\frac{\omega}{\sqrt{2}}\frac{1}{2}(j\underline{\psi}_q);$$

$$0 = \frac{R_e}{s}\underline{I}_e + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_e;$$

$$0 = \frac{R_d}{s}\underline{I}_{Dd} + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{Dd}; \qquad (1.195)$$

$$0 = \frac{R_q}{s}\underline{I}_{Dq} + j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{Dq}.$$

Pe baza ecuațiilor date de relațiile (1.194 a) și a ultimelor trei ecuații din relațiile (1.195) se întocmesc schemele echivalente reprezentate în figura 1.54, în care s-au introdus notațiile:

$$j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_d = \underline{Z}_d\underline{I}_d;$$
$$(1.195\ a)$$
$$j\frac{\omega}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_q = \underline{Z}_q\underline{I}_q.$$

Pe baza cestor notații, dacă se folosesc în continuare și notațiile:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{2}(\underline{I}_d + j\underline{I}_q);$$
$$(1.195\ b)$$
$$\underline{I}_3 = \frac{1}{2}(\underline{I}_d - j\underline{I}_q)$$

atunci, primele două ecuații din relațiile (1.195) devin:

$$\underline{U} = R_1\underline{I}_1 + \frac{1}{2}\underline{Z}_d\underline{I}_d + \frac{1}{2}j\underline{Z}_q\underline{I}_q;$$
$$(1.196)$$
$$0 = R_1\underline{I}_3 + \frac{1}{2}(2s-1)\underline{Z}_d\underline{I}_d - \frac{1}{2}j(2s-1)\underline{Z}_q\underline{I}_q.$$

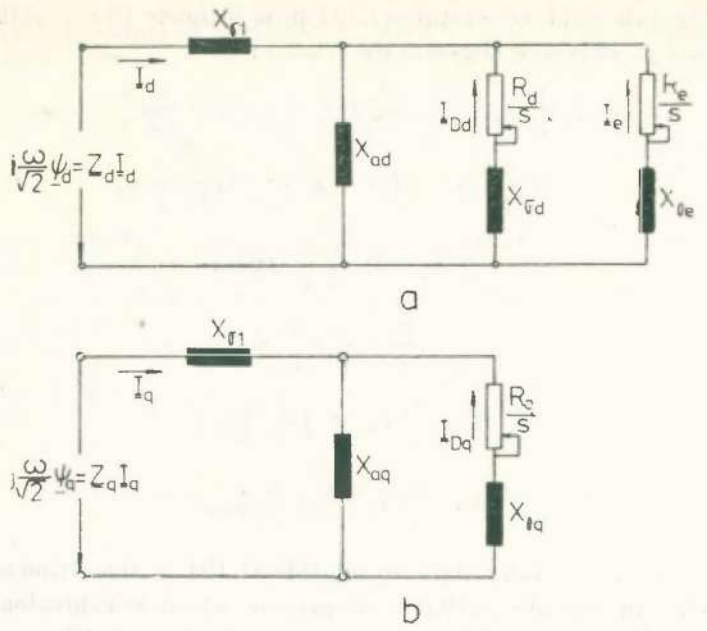


Fig. 1.54 — Schemele echivalente longitudinală (a) și transversală (b) ale mașinii sincrone, la funcționarea asincronă.

După cum se observă, ca urmare a nesimetriei electromagnetice a rotorului, cîmpul magnetic rotoric (produs de rotor în întrefier) se poate descompune în două componente :

— *componenta directă*, care se învîrtește față de rotor cu turația sn_1 ;

— *componenta inversă*, care se învîrtește față de rotor cu turația $-sn_1$.

Cele două cîmpuri magnetice învîrtitoare rotorice au, față de stator, turațiile :

— cea directă : $sn_1 + n = sn_1 + (1 - s)n_1 = n_1$; (1.197)

— cea inversă : $-sn_1 + n = -sn_1 + (1 - s)n_1 = (1 - 2s)n_1$

unde $n = (1 - s)n_1$, este turația rotorului față de stator.

Cîmpul magnetic rotoric de succesiune directă, induce deci în înfășurarea statorului t.e.m. de aceeași fecvență f_1 ca a tensiunii de alimentare, t.e.m. care, împreună cu căderile de tensiune respectve, echilibrează tensiunea rețelei de alimentare.

Cîmpul magnetic rotoric de succesiune inversă, induce în înfășurarea statorului t.e.m. de frecvență $f_3 = |1 - 2s| f_1$, care se închide prin generatoare, rețea și ceilalți consumatori conectați la rețeaua de alimentare respectivă.

OBSERVAȚIE. În expresia frecvenței f_3 s-a luat modulul mărimii $1-2s$, deoarece această mărime poate fi atît pozitivă cît și negativă (în funcție de valorile lui s), însă f_3 trebuie să aibă întotdeauna valori pozitive.

În mod corespunzător curenții i_1 și i_3 (vezi relațiile (1.195 b)), reprezintă deci curenții de frecvențele f_1 și f_3 din înfășurarea statorică.

Din relațiile (1.195 b) rezultă :

$$\underline{I}_d = \underline{I}_1 + \underline{I}_3 ; \qquad (1.198)$$
$$\underline{I}_q = j(-\underline{I}_1 + \underline{I}_3),$$

care introduse în relațiile (1.196), se obține :

$$\underline{U} = R_1\underline{I}_1 + \frac{1}{2}(\underline{Z}_d + \underline{Z}_q)\underline{I}_1 + \frac{1}{2}(\underline{Z}_d - \underline{Z}_q)\underline{I}_3 ;$$
$$0 = \frac{R_1}{2s-1}\underline{I}_3 + \frac{1}{2}(\underline{Z}_d - \underline{Z}_q)\underline{I}_1 + \frac{1}{2}(\underline{Z}_d + \underline{Z}_q)\underline{I}_3. \qquad (1.199)$$

Dacă, în continuare se folosesc notațiile :

$$\underline{Z}_{\sigma d} = \frac{R_d}{s} + jX_{\sigma d} ;$$
$$\underline{Z}_{\sigma q} = \frac{R_q}{s} + jX_{\sigma q} ; \qquad (1.200)$$
$$\underline{Z}_{\sigma e} = \frac{R_q}{s} + jX_{\sigma e}$$

(care reprezintă impedanțele înfășurării de amortizare după cele două axe și a înfășurării de excitație, la funcționarea în asincron) atunci, pe baza schemelor din figura 1.54 se obțin :

— pentru componenta de succesiune directă

$$\underline{Z}_{d1} = \underline{Z}_{\sigma d} + R_1 + jX_{\sigma 1} ;$$
$$\underline{Z}_{q1} = \underline{Z}_{\sigma q} + R_1 + jX_{\sigma 1} ; \qquad (1.200\ a)$$

— pentru componenta de succesiune inversă

$$\underline{Z}_{d3} = \underline{Z}_{ad} + \frac{R_1}{2s-1} + jX_{\sigma 1};$$
$$\underline{Z}_{q3} = \underline{Z}_{aq} + \frac{R_1}{2s-1} + jX_{\sigma 1}, \qquad (1.200\ b)$$

în care (fig. 1.54):

$$\underline{Z}_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{ad}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\sigma 4}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\sigma s}}};$$

$$\underline{Z}_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{jX_{aq}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\sigma 7}}}. \qquad (1.200\ c)$$

Cu aceste notații, rezolvînd sistemul de ecuații dat de relațiile (1.199), rezultă:

$$\underline{I}_1 = \underline{U}\frac{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}{\underline{Z}_{d1}\underline{Z}_{q3} + \underline{Z}_{d3}\underline{Z}_{q1}};$$
$$\underline{I}_3 = -\underline{U}\frac{\underline{Z}_{d1} - \underline{Z}_{q1}}{\underline{Z}_{d1}\underline{Z}_{q3} + \underline{Z}_{d3}\underline{Z}_{q1}}, \qquad (1.201)$$

pe baza cărora, cu relațiile (1.198), se obțin curenții longitudinal și transversal $\underline{I}_d$ și $\underline{I}_q$.

Cuplul electromagnetic, în teoria dublei reacții, în valori instantanee, rezultă cu relația

$$m = \frac{3p}{2}(\psi_{ad} i_q - \psi_{aq} i_d) \qquad (1.202)$$

a cărui curbă se poate trasa punct cu punct, cu ajutorul calculatoarelor electronice.

Valoarea medie a cuplului electromagnetic însă, utilizînd mărimile în complex simplificat, este dată de relația

$$M_{med} = \frac{3p}{2}\mathrm{Re}\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{ad}\underline{I}_q^* - \frac{1}{\sqrt{2}}\underline{\psi}_{aq}\underline{I}_d^*\right\}\ [\mathrm{Nm}]. \qquad (1.202\ a)$$

Dacă se ține seama de relațiile (1.195 a), atunci

$$M_{med} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{-j\underline{Z}_{ad}\underline{I}_d\underline{I}_q^* + j\underline{Z}_{aq}\underline{I}_q\underline{I}_d^*\}. \qquad (1.202\ b)$$

Avînd în vedere relațiile (1.198), rezultă:

$$\underline{I}_d^* = (\underline{I}_1 + \underline{I}_3)^* = \underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*;$$
$$\underline{I}_q^* = [j(-\underline{I}_1 + \underline{I}_3)]^* = (-j)(-\underline{I}_1 + \underline{I}_3)^* = (-j)(-\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*)$$

care, introduse în relația (1.202 b) se obține:

$$M_{med} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{-j\underline{Z}_{ad}(\underline{I}_1 + \underline{I}_3)(-j)(-\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*) +$$
$$+ j\underline{Z}_{aq}(-j\underline{I}_1 + j\underline{I}_3)(\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*)\} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{-\underline{Z}_{ad}(\underline{I}_1 +$$
$$+ \underline{I}_3)(-\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*) + \underline{Z}_{aq}(\underline{I}_1 - \underline{I}_3)(\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^*)\} =$$
$$= \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{-\underline{Z}_{ad}(-\underline{I}_1^2 + \underline{I}_1\underline{I}_3^* - \underline{I}_3\underline{I}_1^* + \underline{I}_3^2) + \underline{Z}_{aq}(\underline{I}_1^2 +$$
$$+ \underline{I}_1\underline{I}_3^* - \underline{I}_3\underline{I}_1^* - \underline{I}_3^2)\} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{\underline{Z}_{ad}(\underline{I}_1^2 - \underline{I}_1\underline{I}_3^* + \underline{I}_1^*\underline{I}_3 - \underline{I}_3^2) +$$
$$+ \underline{Z}_{aq}(\underline{I}_1^2 + \underline{I}_1\underline{I}_3^* - \underline{I}_1^*\underline{I}_3 - \underline{I}_3^2)\}. \qquad (1.202\ c)$$

Dacă se grupează termenii după curenți, expresia cuplului mediu capătă forma

$$M_{med} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\{(\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})\underline{I}_1^2 + (\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})\underline{I}_1^*\underline{I}_3 -$$
$$- (\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})\underline{I}_1\underline{I}_3^* - (\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})\underline{I}_3^2\}. \qquad (1.202\ d)$$

Pentru expresiile curenților $\underline{I}_1$ și $\underline{I}_3$, date de relațiile (1.201), conform cărora

$$\frac{\underline{I}_3}{\underline{I}_1} = -\frac{\underline{Z}_{d1} - \underline{Z}_{q1}}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}} = -\frac{\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq}}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}, \qquad (1.203)$$

relația (1.202 d) devine:

$$M_{med} = \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\left\{(\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})\underline{I}_1^2 - (\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})\frac{\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq}}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}\underline{I}_1^2 +\right.$$
$$\left. + (\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})\frac{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}{\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq}}\underline{I}_3^2 - (\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})\underline{I}_3^2\right\} =$$
$$= \frac{3p}{2\omega}\mathrm{Re}\left\{\left[(\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq}) - \frac{(\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})^2}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}\right]\underline{I}_1^2 +\right.$$

$$+ [(\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}) - (\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})]\underline{I}_3^2\Big\} =$$

$$= \frac{3p}{2\omega} \mathrm{Re}\left\{\frac{1}{2}\left[(\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq}) - \frac{(\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})^2}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}\right] I_1^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}[(\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}) - (\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq})]\underline{I}_3^2\right\}. \qquad (1.204)$$

Dacă se notează

$$\underline{Z}_{2e} = \frac{1}{2}\left[(\underline{Z}_{ad} + \underline{Z}_{aq}) - \frac{(\underline{Z}_{ad} - \underline{Z}_{aq})^2}{\underline{Z}_{d3} + \underline{Z}_{q3}}\right] = R_{2e} + jX_{2e} \qquad (1.205)$$

și se au în vedere relațiile (1.200 b), care mai întîi se adună, apoi se grupează termenii, atunci valoarea medie a cuplului electromagnetic se obține:

$$M_{med} = \frac{3p}{\omega} \mathrm{Re}\left\{\underline{Z}_{2e}\underline{I}_1^2 + \left(\frac{R_1}{2s-1} + jX_{\sigma 1}\right)\underline{I}_3^2\right\}$$

adică

$$M_{med} = \frac{3p}{\omega}\left(R_{2e}I_1^2 + \frac{R_1}{2s-1}I_3^2\right) \quad [\mathrm{Nm}]. \qquad (1.206)$$

Dacă în relația (1.206) se utilizează mărimile în unități relative (u.r.), iar cuplul se raportează la cuplul util de la arbore, atunci se obține expresia finală a cuplului electromagnetic mediu, la pornirea în asincron, în unități relative

$$\underset{\sim}{M} = \underset{\sim}{M}_{med} = \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N}\left(r_{2e}I_1^2 + \frac{r_1}{2s-1}I_3^2\right) \quad [\mathrm{u.r.}] \qquad (1.207)$$

sau, în valori absolute

$$M = M_{med} = \underset{\sim}{M}_{med} M_N \ [\mathrm{Nm}] \qquad (1.207\ \mathrm{a})$$

în care, cuplul nominal util la arbore este

$$M_N = 9\,560\,\frac{P_N}{n_1} \quad [\mathrm{Nm}] \qquad (1.207\ \mathrm{b})$$

cu P_N în kW și n_1 în rot/min.

Valoarea eficace a curentului rezultant din indus, este

$$\underset{\sim}{I} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} \ [\mathrm{u.r.}]. \qquad (1.208)$$

Pentru alunecarea $s = 1$, se obțin valorile caracteristice corespunzătoare pornirii, adică M_p și I_p care trebuie să se încadreze în limitele impuse prin temă.

Curentul din înfășurarea de excitație, conform schemei echivalente din figura 1.54 a rezultă

$$\underline{I}_{ex} = \underline{I}_d \frac{\underline{Z}_{ad}}{\underline{Z}_{\sigma e}} \qquad (1.209)$$

sau, în modul

$$I_{ex} = \sqrt{(I_{1a} + I_{3a})^2 + (I_{1r} + I_{3r})^2} \cdot \frac{|\underline{Z}_{ad}|}{|\underline{Z}_{\sigma e}|} \quad [\mathrm{u.r.}], \qquad (1.210)$$

Valoarea, în A, a curentului din înfășurarea de excitație este dată de relația

$$I_{ex} = \underset{\sim}{I}_{ex} \frac{k_{ad}F_a}{2\sqrt{2}w_e} \quad [\mathrm{A}]. \qquad (1.210\ \mathrm{a})$$

Valoarea acestui curent în domeniul $s = 1 \div 0{,}05$ este foarte importantă deoarece, în funcție de durata pornirii în asincron, se determină energia necesară dimensionării rezistenței de descărcare pe care este conectată înfășurarea de excitație în timpul pornirii.

Caracteristicile de pornire în asincron $M(s)$ și $I(s)$, se trasează cu ajutorul tabelului 1.10, în care, pentru alunecare s-au adoptat valorile cele mai semnificative: $s = 1$; $s = 0{,}55$; $s = 0{,}5$; $s = 0{,}45$; $s = 0{,}25$; $s = 0{,}1$; $s = 0{,}05$.

Forma acestor caracteristici este indicată în figura 1.55. O importanță deosebită pentru o ușoară intrare în sincronism, o are cuplul corespunzător alunecării $s = 0{,}05$ numit și „cuplul de intrare", care în cazul pornirii în sarcină, trebuie să aibă valoarea mai mare decît cuplul nominal.

OBSERVAȚIE. Forma curbei cuplului de pornire în asincron $M(s)$, reprezentată în figura 1.52 și figura 1.55, cu șaua mai mult sau mai puțin pronunțată în jurul alunecării $s = 0{,}5$ datorită cuplului monoaxial, este cea calculată teoretic.

Referitor la curbele rezultate experimental ale cuplului de pornire în asincron, se pot face următoarele mențiuni:

a) În cazul cînd *barele coliviei de pornire sînt din alamă*, **deci cu o rezistență mare, pentru valori mici ale tensiunii de alimentare la pornire ($U \leqslant 0{,}64U_N$), între curbele $M(s)$ trasate teoretic și cele rezultate experimental există o apropiere satisfăcătoare.**

TABELUL 1.10

DATE	$s = 1$	$s = 0{,}55$	$s = 0{,}5$	$s = 0{,}45$	$s = 0{,}25$	$s = 0{,}1$	$s = 0{,}05$
$\underline{z}_{\sigma d} = \frac{r_d}{s} + jx_{\sigma d}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{\sigma Q} = \frac{r_Q}{s} + jx_{\sigma Q}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{\sigma e} = \frac{r_e}{s} + jx_{\sigma e}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma d}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma e}}}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{aQ} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aQ}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma Q}}}$ [u.r.]							
$\frac{\lvert \underline{z}_{ad} \rvert}{\lvert \underline{z}_{\sigma e} \rvert}$							
$\underline{z}_{d1} = \underline{z}_{ad} + r_1 + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{Q1} = \underline{z}_{\sigma Q} + r_1 + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{d3} = \underline{z}_{ad} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]							
$\underline{z}_{Q3} = \underline{z}_{\sigma Q} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]							

TABELUL 1.10. (continuare)

DATE	$s = 1$	$s = 0{,}55$	$s = 0{,}5$	$s = 0{,}45$	$s = 0{,}25$	$s = 0{,}1$	$s = 0{,}05$
$\underline{z}_{1e} = \frac{1}{2}\left[(\underline{z}_{ad} + \underline{z}_{eQ}) - \frac{(\underline{z}_{ad} - \underline{z}_{eQ})^2}{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{Q3}}\right] = r_{1e} + jx_{1e}$ [u.r.]							
$\underline{I}_1 = \underline{U}\frac{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{Q3}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{Q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{Q1}} = \underset{\sim}{I}_{1a} + j\underset{\sim}{I}_{1r}$ [u.r.]							
$\underline{I}_3 = -\underline{U}\frac{\underline{z}_{d1} - \underline{z}_{Q3}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{Q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{Q1}} = \underset{\sim}{I}_{3a} + j\underset{\sim}{I}_{3r}$ [u.r.]							
$\underset{\sim}{I}_1^2 = \underset{\sim}{I}_{1a}^2 + \underset{\sim}{I}_{1r}^2$							
$\underset{\sim}{I}_3^2 = \underset{\sim}{I}_{3a}^2 + \underset{\sim}{I}_{3r}^2$							
$\underset{\sim}{M} = \underset{\sim}{M}_{med} = \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N}\left(r_{2e}\underset{\sim}{I}_1^2 + \frac{r_1}{2s-1}\underset{\sim}{I}_3^2\right)$ [u.r.]							
$\underset{\sim}{I} = \sqrt{\underset{\sim}{I}_1^2 + \underset{\sim}{I}_3^2}$ [u.r.]							
$\underset{\sim}{I}_{ex} = \sqrt{(\underset{\sim}{I}_{1a} + \underset{\sim}{I}_{3a})^2 + (\underset{\sim}{I}_{1r} + \underset{\sim}{I}_{3r})^2} \cdot \frac{\lvert \underline{z}_{ad} \rvert}{\lvert \underline{z}_{\sigma e} \rvert}$ [u.r.]							
$I_{ex} = \underset{\sim}{I}_{ex}\frac{k_{aQ}I_n}{2\sqrt{2}w_e}$ [A]							

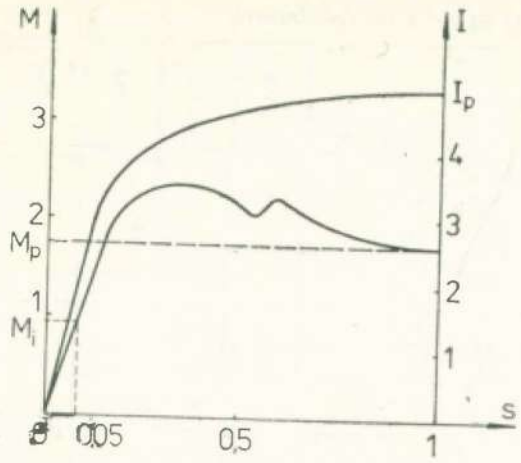


Fig. 1.55 — Caracteristicile de pornire în asincron ale motorului sincron.

Pentru pornirea cu tensiunea nominală, cuplul de pornire rezultat experimental este mai mare decît cel calculat teoretic, deoarece intervine saturația magnetică care influențează reactanțele mașinii, în sensul micșorării lor (vezi paragraful 1.16).

Șaua prezentată de aceste curbe (pentru bare de alamă) este practic inexistentă, ea manifestîndu-se printr-un maxim corespunzător alunecării $s = 0{,}5$ și o scădere ceva mai accentuată pentru valori ale alunecării mai mici ca 0,5 (vezi fig. 2.7 de la exemplul de calcul).

b) În cazul cînd *barele coliviei de pornire sînt din cupru* **deci cu o rezistență mică, între curbele $M(s)$ trasate teoretic și cele rezultate experimental există diferențe mari, dar numai în ceea ce privește forma acestora. Astfel în timp ce la curbele calculate cu metoda prezentată se evidențiază clar șaua corespunzătoare alunecării $s = 0{,}5$, la cele rezultate experimental șaua nu apare. Mai mult, în cazul în care se consideră înfășurarea de excitație scurtcircuitată ($k_{de} = 0$) șaua din curba $M(s)$ calculată se accentuează, în timp ce la curba experimentală nu numai că nu apare, ci forma curbei de pornire este chiar mai avantajoasă pentru valorile alunecării apropiate de 0,5 față de cazul în care înfășurarea de excitație este închisă pe o rezistență de descărcare de cca 10 ori valoarea rezistenței proprii ($k_{de} = 10$).**

Aceste neconcordanțe au fost sesizate și studiate pentru prima dată de A. Nicolaide. Explicația acestora rezultă din faptul că în

teoria uzuală a dublei reacții, prezentată și în lucrarea de față, se consideră pe rotor în axa longitudinală două circuite electrice, iar în axa transversală un circuit. În realitate însă, există mai multe circuite, numărul acestora fiind determinat, în afară de înfășurarea de excitație, de numărul perechilor de bare ale coliviei. Un calcul mai precis al caracteristicilor de pornire în asincron cu considerarea tuturor acestor circuite și recomandat în special pentru barele din cupru, se poate face după metodica indicată în [10]. Explicația enunțată este valabilă și pentru barele din alamă, însă deoarece acestea au rezistența mult mai mare ca cele de cupru, neconcordanța între caracteristicile calculate și cele determinate experimental este practic neglijabilă.

În concluzie, se poate aprecia că metodica de calcul a caracteristicilor de pornire indicată în lucrarea de față, conduce la valori ceva mai mici decît cele rezultate experimental, ceea ce, pentru proiectanți, constituie o oarecare acoperire.

Este evident că și la barele din cupru saturația magnetică are aceeași influență ca la barele din alamă, adică M_p rezultat experimental este mai mare ca M_p calculat.

1.16. INFLUENȚA SATURAȚIEI MAGNETICE ASUPRA PARAMETRILOR MAȘINII SINCRONE

După cum se știe (vezi paragraful 1.8 punctele 2 și 3), determinarea reactanțelor mașinii sincrone s-a făcut pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare :

— circuitul magnetic al mașinii are o caracteristică liniară de magnetizare, adică se neglijează saturația și fenomenul de histerezis, iar intensitatea cîmpului magnetic în părțile de fier ale circuitului magnetic se consideră nulă ;

— nu se iau în seamă decît armonicile fundamentale ale solenațiilor de excitație și de reacție (și ale cîmpurilor magnetice).

În realitate însă, atît pentru solicitările magnetice normale, corespunzătoare tensiunii nominale, cît mai ales pentru valori mari ale curenților din înfășurări, saturația magnetică a fierului conduce la o creștere a reluctanței circuitului magnetic după care se închid liniile fluxului principal și respectiv liniile fluxului transversal de scăpări în crestătură și liniile fluxului produs de armonicile superioare ale cîmpului magnetic din întrefier. Ca urmare,

în funcție de gradul de saturație magnetică a fierului, are loc o micșorare a permeanței și în consecință o micșorare a reactanțelor respective.

Rezultă deci că sînt afectate de saturația magnetică atît reactanțele utile ale mașinii, pentru tensiuni apropiate sau mai mari ca cea nominală, cît și reactanțele de scăpări în crestătură și diferențiale, pentru valori ale curenților mult mai mari decît cea nominală (cazul pornirii în asincron a motoarelor sincrone prin cuplare directă la rețea).

Așadar, se recomandă luarea în considerație a efectului saturației magnetice asupra parametrilor mașinii sincrone atît în cazul determinării caracteristicilor de funcționare nominală și a solenației de excitație la sarcină nominală, cînd sînt afectate de saturație numai reactanțele utile (vezi paragraful 1.9.2, punctul B1, inclusiv observația) cît și în cazul pornirii în asincron a motoarelor sincrone, prin cuplare directă la rețea (deci la U_{1N}, cînd curenții de pornire sînt mari), sau la scurtcircuit brusc, cînd sînt afectate de saturația magnetică atît reactanțele utile, cît și reactanțele de scăpări în crestăturile coliviei de pornire (amortizare) și ale indusului (statorului).

1.16.1. INFLUENȚA SATURAȚIEI MAGNETICE ASUPRA REACTANȚELOR UTILE

1. *Mașinile sincrone cu poli înecați*

Valoarea nesaturată a reactanței utile corespunzătoare fluxului de reacție a indusului este dată de relația (1.103). Conform figurii 1.56, această valoare corespunde tangentei unghiului de înclinare a dreptei (1), dreaptă care corespunde tensiunii magnetice a întrefierului și se determină prin prelungirea porțiunii liniare a caracteristicii de funcționare în gol a mașinii.

Dar, la funcționarea normală cînd intervine și saturația circuitului magnetic al mașinii, înclinarea dreptei și deci valoarea reactanței utile, depinde de poziția punctului C de funcționare pe caracteristica magnetică a mașinii, poziție care este determinată de valoarea t.e.m. rezultantă în întrefier E_1.

Rezultă astfel că, valoarea saturată a reactanței utile depinde de valoarea t.e.m. rezultante a mașinii.

În practică interesează cel mai mult, cazul în care t.e.m. rezultantă în întrefier E_1, corespunde tensiunii nominale la borne U_{1N}.

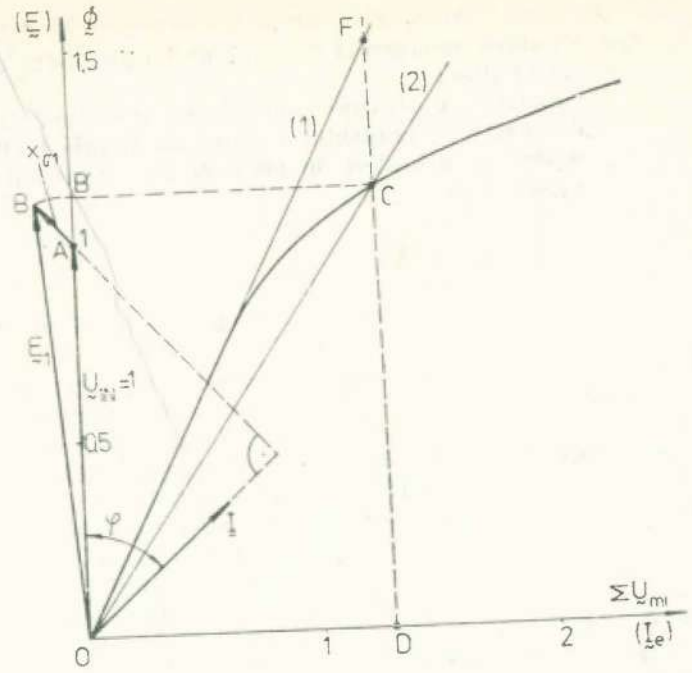


Fig. 1.56 — Determinarea coeficientului de saturație magnetică la mașinile cu poli înecați

În figura 1.56, este reprezentat modul de determinare al punctului C de pe caracteristica de funcționare în gol $\Phi = f(\Sigma U_{mi})$ a mașinii sincrone cu poli înecați, corespunzător t.e.m. rezultante în întrefier E_1 obținută din diagrama fazorială avînd pe ordonată tensiunea nominală U_{1N} și defazajul φ al curentului; punctul B' se obține prin rabaterea pe ordonată a fazorului $E_1 = \overline{OB}$.

Înclinarea dreptei (2), față de abscisă este dată de valoarea saturată a reactanței utile corespunzătoare fluxului de reacție a indusului, valoare care, așa cum se observă, este mai mică decît cea nesaturată (corespunzătoare dreptei (1)).

Așadar, valoarea saturată a reactanței utile corespunzătoare fluxului de reacție a indusului, rezultă conform [5]

$$x_{as} = k_{sa} x_a \text{ [u.r.]} \qquad (1.211)$$

în care :

x_a este valoarea nesaturată a reactanței utile, dată de relația (1.103) ;

k_{sa} — coeficient care ține cont de scăderea coeficientului de reacție a indusului k_a (dat de relația (1.103 a)), datorită saturației magnetice. În conformitate cu figura 1.56

$$k_{sa} = \frac{\overline{DC}}{\overline{DF}}. \qquad (1.211\ a)$$

2. *Mașinile sincrone cu poli aparenți și cu rotorul în variantă combinată*

După cum se știe, influența saturației circuitului magnetic asupra ecuațiilor funcționale adică asupra reactanțelor utile ale mașinii sincrone cu poli aparenți și cu rotorul în variantă combinată, este mult mai dificilă decît în cazul mașinii cu poli înecați, deoarece pe lîngă dependența neliniară dintre fluxuri și solenațiile respective, mai intervine și nesimetria constructivă a mașinii după cele două axe, longitudinală și transversală.

S-ar putea crede că și în acest caz valoarea saturată a reactanței utile se poate determina cu ajutorul caracteristicii de funcționare în gol $\Phi = f(\Sigma U_{mt})$ sau $E_0 = f(I_e)$. Dar, pentru aceste mașini, caracteristica de funcționare în gol corespunde unui cîmp magnetic longitudinal, iar caracteristica t.e.m. rezultante în întrefier E_1, corespunde cîmpului magnetic rezultant, cele două cîmpuri avînd variații cu totul diferite la periferia interioară a statorului (în întrefier) și dictînd saturații locale cu totul diferite.

T.e.m. rezultantă $\underset{\sim}{E}_1$, indusă de fundamentala cîmpului rezultant din întrefier, se poate descompune în două componente : t.e.m. longitudinală $\underset{\sim}{E}_{1d}$, indusă de fundamentala cîmpului rezultant longitudinal (compus din cîmpul principal al polilor și cîmpul longitudinal de reacție a indusului) și t.e.m. transversală $\underset{\sim}{E}_{1q}$, indusă de fundamentala cîmpului rezultant transversal (dat de cîmpul transversal de reacție a indusului).

Legătura dintre aceste componente ale t.e.m. rezultante și cîmpul fictiv longitudinal și transversal, cît și modul în care se influențează reciproc cîmpul longitudinal și transversal sînt expuse detaliat în paragraful 1.9.2, punctul B.1.

A reieșit astfel că, în funcție de unghiul ψ, apare o solenație transversală a indusului care, la o saturație mai pronunțată a circuitului magnetic, cîmpul longitudinal rezultant este slăbit prin cîmpul transversal și că această influență reciprocă depinde

de gradul de saturație a fierului statorului, adică de raportul $U_{m\delta d\,i}/U_{m\delta}$ și nu depinde de tensiunea magnetică U_{mR} a rotorului, dacă suprafața piesei polare este o suprafață echipotențială, ceea ce corespunde cazului real din practică.

În concluzie, se poate admite deci că valorile saturate ale reactanțelor utile ale fluxului de reacție a indusului pentru mașinile cu poli aparenți și cu rotorul în variantă combinată sînt :

— după axa longitudinală

$$x_{ads} = k_{sd} x_{ad}\ [\text{u.r.}] ; \qquad (1.212)$$

— după axa transversală

$$x_{aqs} = k_{sq} x_{aq}\ [\text{u.r.}] \qquad (1.212\ a)$$

în care :

x_{ad} este valoarea nesaturată a reactanței utile corespunzătoare fluxului de reacție longitudinală a indusului, dată de relația (1.96) ;

x_{aq} — valoarea nesaturată a reactanței utile corespunzătoare fluxului de reacție transversală a indusului, dată de relația (1.99) ;

k_{sd}, k_{sq} sînt coeficienți care țin cont de scăderea factorilor de raportare după cele două axe k_{ad} și k_{aq}, datorită saturației magnetice, avînd aceleași valori ca cele utilizate în relațiile (1.136) sau (1.137) și în relația (1.139) (cu semnul (—) deasupra, pentru $\delta_M/\delta = 1$ sau cu semnul (~) deasupra, pentru $\delta_M/\delta = 1{,}5 \div 2{,}5$).

1.16.2. INFLUENȚA SATURAȚIEI MAGNETICE ASUPRA REACTANȚELOR DE SCĂPĂRI

După cum se știe, reactanțele de scăpări corespund fluxului de scăpări în porțiunea respectivă a înfășurării mașinii.

Zona cu ponderea cea mai mare, în ceea ce privește fluxul de scăpări este cea corespunzătoare crestăturilor, deoarece o mare parte din circuitul magnetic al fluxului transversal de scăpări este constituit de fierul dinților și al istmului crestăturilor.

Rezultă deci că saturația magnetică a acestor porțiuni, este dictată în principal de solenația crestăturilor adică de curentul din înfășurări. Pentru funcționarea normală a mașinii cînd valorile curentului nu depășesc cu mult curentul nominal, adică $I \leqslant$

$\leqslant (1{,}5 \div 2) I_N$, efectul saturației magnetice este neglijabil ; pentru curenți mari însă, așa cum se întîmplă în cazul scurtcircuitului brusc, sau în cazul pornirii în asincron a motorului sincron prin cuplare directă la rețea (deci la tensiune nominală) cînd curentul de pornire $I_p \geqslant (3 \div 4) I_N$, efectul saturației magnetice asupra reactanțelor de scăpări nu mai poate fi neglijat.

Astfel, la valori mari ale curentului de pornire (din stator și din colivia de pornire a rotorului), cîmpul propriu de scăpări în crestături este foarte intens contribuind la saturația istmurilor crestăturilor stator și rotor (de pornire), saturație care are ca efect micșorarea reactanțelor de scăpări în aceste crestături. Se saturează de asemenea și zona circuitului magnetic corespunzătoare cîmpului de scăpări diferențiale.

Este indicat deci, ca în cazul pornirii la U_N, valorile caracteristicilor de pornire corespunzătoare alunecării $s = 1$, să fie calculate cu parametrii (reactanța de scăpări a statorului și a coliviei de pornire) afectați de saturația magnetică, iar în cazul barelor coliviei de formă dreptunghiulară afectați și de refularea curentului din bare.

Influența saturației asupra acestor reactanțe se va considera ca în volumul II, paragraful 1.8.5, reprodusă sumar în continuare.

Astfel, reactanța de scăpări a statorului, valoarea saturată, este

$$x_{\sigma 1 s} = x_{\sigma 1} \frac{\Sigma \lambda_{1 s}}{\Sigma \lambda_1} \text{ [u.r.]} \tag{1.213}$$

în care :

$\Sigma \lambda_1$ este permeanța specifică totală (nesaturată), dată de relația (1.85 a) ;

$\Sigma \lambda_{1s}$ — permeanța specifică totală (saturată), dată de relația (vezi și relația (1.85 a))

$$\Sigma \lambda_{1 s} = \lambda_{c 1 s} + \lambda_{d 1 s} + \lambda_{z 1} + \lambda_{f 1} \tag{1.214}$$

unde :

λ_{c1s} este permeanța specifică saturată a crestăturii, care se calculează utilizînd relațiile (1.86), (1.87), (1.88) și (1.89).

Pentru aceasta, în relația (1.86), în termenul care conține pe h_2 se introduce la numitor b_c'', adică :

$$\lambda_{c 1 s} = \frac{h_1 - h_4}{3 b_c} k_\beta + \frac{h_2}{b_c''} k_\beta' + \frac{h_4}{4 b_c} \tag{1.215}$$

iar în relațiile (1.87), (1.88) și (1.89), în locul lui $a_{s,r}$ se introduce $a_{s,r}''$, unde valorile majorate ale lățimilor istmurilor sînt :

$$b_c'' = b_c + \frac{b_{d \min}}{\mu'} ;$$

$$a_{s,r}'' = a_{s,r} + \frac{b_{d0}}{\mu'} \tag{1.215 a}$$

în care :

$b_{d \min} = t_1 - b_c$ este lățimea minimă a dintelui statorului (indusului) ;

$b_{d0} = t_{1,2} - a_{s,r}$, este lățimea dintelui în dreptul istmului crestăturii indusului (pentru crestături semiînchise sau semideschise) ;

$\mu' = \dfrac{B_{dk}}{\mu_0 (H_{dk} + \underset{\sim}{I}_p A_N)}$ este permeabilitatea relativă echivalentă (1.215 b)

unde :

$\underset{\sim}{I}_p = I_p / I_N$ este valoarea relativă a curentului de pornire ;

A_N — pătura de curent nominală, în A/m ;

$B_{dk} = 2{,}04$ T și $H_{dk} = 300 \cdot 10^2$ A/m, valorile critice (de saturație) pentru tabla silicioasă laminată la rece cu cristale neorientate ;

$$\lambda_{d 1 s} = \frac{\lambda_{d1}}{k_{sp}} \tag{1.216}$$

unde :

λ_{d1} este permeanța specifică a scăpărilor diferențiale, dată de relația (1.90) ;

k_{sp} — coeficientul de saturație magnetică parțială al dinților indusului (statorului)

$$k_{sp} = \frac{U_{m\delta} + U_{md1}}{U_{m\delta}} . \tag{1.216 a}$$

Reactanțele de scăpări ale înfășurării de amortizare după cele două axe, valori saturate, rezultă cu relația (1.171) și respectiv cu relația (1.172), însă în ambele relații se vor lua reactanțe utile saturate x_{ads} și x_{aqs} date de relațiile (1.212) și (1.212 a) iar în locul

lui λ_{ca} se va lua valoarea saturată a permeanței specifice λ_{cas}, dată de relațiile (vezi și relațiile (1.171 a) și (1.171 b):

— pentru crestătura rotundă (fig. 1.16 d)

$$\lambda_{cas} = \left(0{,}785 - \frac{b_0}{2d_a}\right) + \frac{h_0}{b_0''}; \tag{1.217}$$

— pentru crestătura dreptunghiulară

$$\lambda_{cas} = \frac{h}{3b_c} + \frac{h_0}{b_0''} \tag{1.217 a}$$

unde, valoarea majorată a lățimii istmului crestăturii înfășurării de amortizare este

$$b_0'' = b_0 + \frac{b_{d0}}{\mu'} \tag{1.217 b}$$

cu:

$$b_{d0} = t_a - b_0;$$

μ', dat de relația (1.215 b).

Rezultă astfel că valorile saturate ale reactanțelor de scăpări ale coliviei de amortizare se determină cu relațiile:

— după axa longitudinală (vezi și relația (1.171))

$$x_{\sigma ds} = \frac{\pi\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}}\left[l_{Fe2}(\lambda_{cas} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_d\right]\frac{1}{4C_D} + \sigma_{ad}x_{ads} \text{ [u.r.]};$$

(1.218)

— după axa transversală (vezi și relația (1.172))

$$x_{\sigma qs} = \frac{\pi\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}}\left[l_{Fe2}(\lambda_{cas} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_q\right]\frac{1}{4C_Q} + \sigma_{aq}x_{aqs} \text{ [u.r.]}.$$

(1.219)

În concluzie, se reamintește că valorile parametrilor afectați de saturația magnetică, trebuie considerate la determinarea caracteristicilor de funcționare nominală (pentru reactanțele utile) și la scurtcircuit brusc și la determinarea caracteristicilor de pornire în asincron prin cuplarea directă la rețea, adică la tensiunea nominală și la alunecarea $s = 1$ (atît pentru reactanțele utile, cît și pentru cele de scăpări).

Capitolul 2

EXEMPLU DE CALCUL ELECTOMAGNETIC

Exemplul de calcul are drept scop parcurgerea întregii metodologii de proiectare a mașinii sincrone, în regim de generator și motor, pe un exemplu concret.

Calculul se va efectua în paralel pe aceeași mașină, lucrînd în cele două regimuri, astfel încît să se obțină din gabaritul respectiv aceeași putere interioară și aproximativ aceleași dimensiuni ale rotorului. Din această cauză se vor alege, pentru cele două regimuri, astfel de date nominale încît să se coreleze între ele, la anumite dimensiuni stabilite, solicitările electromagnetice atît ca generator cît și ca motor.

Pentru o edificare mai completă a celor ce proiectează pentru prima dată o astfel de mașină, se va avea în vedere mai întîi mașina sincronă cu poli aparenți, apoi în aproximativ același stator se vor exemplifica și celelalte variante constructive de rotoare (varianta combinată și cu poli înecați).

Ca urmare, exemplul de calcul se va efectua în 3 cazuri:

— *cazul 1*, cuprinde calculul electromagnetic al unei mașini sincrone *cu poli aparenți*, ca generator și motor, în paralel (datele care diferă sînt despărțite printr-o linie verticală);

— *cazul 2*, cuprinde calculul electromagnetic al unei mașini sincrone *cu rotorul în variantă combinată*, care va avea aceeași lățime a piesei polare și aproximativ același stator ca în cazul 1 (recalculat însă în funcție de solicitările electromagnetice indicate pentru această variantă);

— *cazul 3*, cuprinde calculul electromagnetic al unei mașini sincrone *cu poli înecați*, cu aproximativ același stator ca în cazul 1 (recalculat, ca și în cazul 2, în funcție de solicitările electromagnetice indicate).

CAZUL 1. Să se proiecteze un:

GENERATOR SINCRON TRIFAZAT	MOTOR SINCRON TRIFAZAT

avînd următoarele date:

$S_N = 440$ kVA;	$P_N = 400$ kW;
$U_N = 6\,300$ V;	$U_N = 6\,000$ V;
$n_1 = 1\,000$ rot/min;	$n_1 = 1\,000$ rot/min;
$f_1 = 50$ Hz;	$f_1 = 50$ Hz;
$m = 3$;	$m = 3$;
$\cos \varphi_N = 0{,}8$ (inductiv);	$\cos \varphi_N = 0{,}9$ (capacitiv);
	— pornire în asincron cu:
	$\frac{M_p}{M_N} \geqslant 1{,}2$;
	$\frac{I_p}{I_N} \leqslant 6$;

Tipul constructiv: IMB3 STAS 3998/1-74;
Tipul de protecție: IP 23 STAS 625-71;
Construcția rotorului: *cu poli aparenți*;
Serviciul: S_1 (continuu) STAS 1893-78.

Întrucît pentru fazele statorului nu se impune nici o condiție se alege conexiunea stea (Y).

OBSERVAȚIE. În expunerea exemplului se va folosi linia despărțitoare în dreptul mărimilor care diferă de la generator la motor; acolo unde lipsește linia despărțitoare elementele sînt comune.

2.1. CALCULUL PRINCIPALELOR MĂRIMI

1. *Curentul nominal pe fază*, pentru conexiunea Y este

conform relației (1.1)

$$I_{NG} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} = \frac{440 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6\,300} = 40{,}32 \text{ A}.$$

conform relației (1.3)

$$I_{NM} = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \eta_N \cos \varphi_N} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6\,000 \cdot 0{,}938 \cdot 0{,}9} = 45{,}6 \text{ A}$$

în care: $\eta_N = 0{,}938$ din figura 1.1.

2. *T.e.m. nominală de fază* conform relației (1.5)

$$E_{1N} = k_{EG}U_{1G} = 1{,}08 \cdot 3637 = 3\,928 \text{ V} \qquad E_{1N} = k_{EM}U_{1M} = 1{,}055 \cdot 3\,464 = 3\,954 \text{ V} \quad (2.2)$$

în care:

tensiunea nominală de fază pentru conexiunea Y este:

$$U_{1NG} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6\,300}{\sqrt{3}} = 3\,637 \text{ V}; \qquad U_{1NM} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{6\,000}{\sqrt{3}} = 3\,464 \text{ V};$$

$k_{EG} = 1{,}08.$ $\qquad k_{EM} = 1{,}055.$

3. *Puterea aparentă interioară nominală* conform relației (1.7)

$$S_{iN} = k_{EG}S_N = 1{,}08 \cdot 440 = 475 \text{ kVA}. \qquad S_{iN} = k_{EM}S_N = 1{,}055 \cdot 474 = 500 \text{ kVA} \quad (2.3)$$

unde, conform relației (1.7 a)

$$S_N = \frac{P_N}{\eta_N \cos \varphi_N} = \frac{400}{0{,}938 \cdot 0{,}9} = 474 \text{ kVA}.$$

OBSERVAȚIE. Deoarece puterile aparente interioare pentru mașina sincronă ca generator și ca motor sînt apropiate, lucru care fusese anticipat din datele nominale, dimensiunile principale ale mașinii se vor stabili pentru valoarea cea mai mare a puterii interioare, urmînd ca valoarea exactă a solicitărilor electromagnetice să se determine pentru fiecare regim în parte.

Ca urmare stabilirea dimensiunilor principale se va face cu puterea interioară $S_{iN} = 500$ kVA.

4. *Numărul de perechi de poli*, conform relației (1.8)

$$p = \frac{60 f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1\,000} = 3.$$

5. *Factorul de înfășurare k_w, de formă a t.e.m. k_B și coeficientul de acoperire ideală a pasului polar α_i*

— Factorul de înfășurare se alege conform relației (1.9 d)

$$k_w = 0{,}92. \quad (2.4)$$

— Factorul de formă k_B și coeficientul de acoperire ideală a pasului polar α_i, conform figurii 1.3 rezultă :

$$k_B = 1{,}14 ;$$
$$\alpha_i = 0{,}61 \qquad (2.5)$$

pentru următoarele valori alese conform paragrafului 1.1.5 B :

$$\alpha_p = 0{,}7 ;$$
$$\delta_M/\delta = 2 ; \qquad (2.5\ a)$$
$$\delta/\tau = 0{,}02.$$

2.2. CALCULUL DIMENSIUNILOR PRINCIPALE

1. *Diametrul interior al statorului* (orientativ) conform relației (1.11)

$$D = \sqrt[3]{\frac{60 S_{iN} 2p}{\pi C n_1 \lambda}} = \sqrt[3]{\frac{60 \cdot 500 \cdot 10^3 \cdot 6}{\pi \cdot 255 \cdot 1\,000 \cdot 2}} = 4{,}82 \text{ dm} = 48{,}2 \text{ cm} \qquad (2.6)$$

în care :

$C = 255$ J/dm³ din figura 1.5 ;

$\lambda = 0{,}75 \div 2{,}1$ din figura 1.6.

Pentru a obține dimensiuni mai mici se estimează

$$\lambda = 2.$$

După o altă metodă și anume conform curbelor din figura 1.4, pentru $S_{iN} = 500$ kVA și $p = 3$, rezultă

$$D = 55 \text{ cm}. \qquad (2.6\ a)$$

2. *Diametrul exterior al statorului* conform relației (1.10), pentru prima valoare a lui D (calculată), rezultă

$$D_e = k_D D = 1{,}45 \cdot 48{,}2 = 69{,}9 \text{ cm},$$

iar pentru diametrul D din curbe, rezultă

$$D_e = k_D D = 1{,}45 \cdot 55 = 79{,}75 \text{ cm},$$

în care, conform tabelului 1.1, s-a luat $k_D = 1{,}45$.

Din tabelul 1.2 se observă că valoarea normalizată a diametrului exterior cea mai apropiată este :

$$D_e = 740 \text{ mm} = 74 \text{ cm} \qquad (2.7)$$

pentru care rezultă diametrul interior D, recalculat

$$D = \frac{D_e}{k_D} = \frac{74}{1{,}45} = 52 \text{ cm}. \qquad (2.7\ a)$$

3. *Pasul polar*

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 52}{6} = 27{,}2 \text{ cm}. \qquad (2.8)$$

4. *Solicitările electromagnetice* A și B_δ așa cum rezultă din figura 1.7 au valorile :

$$A = 380 \text{ A/cm} ;$$
$$B_\delta = 0{,}8 \text{ T}. \qquad (2.9)$$

Întrucît se folosește clasa de izolație F se adoptă o valoare a păturii de curent majorată cu 7%. Se obține astfel

$$A = 407 \text{ A/cm} = 407 \cdot 10^2 \text{ A/m} ;$$
$$B_\delta = 0{,}8 \text{ T}. \qquad (2.9\ a)$$

5. *Lungimea ideală*, conform relației (1.15)

$$l_i = \frac{60 S_{iN}}{k_{CA} \pi^2 D^2 n_1 A B_\delta} = \frac{60 \cdot 500 \cdot 10^3}{0{,}62 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}52^2 \cdot 1\,000 \cdot 407 \cdot 10^2 \cdot 0{,}8} =$$
$$= 0{,}557 \text{ m} = 55{,}7 \text{ cm} \qquad (2.10)$$

unde :

$$k_{CA} = \frac{\pi k_w}{2\sqrt{2}} \alpha_i = \frac{\pi \cdot 0{,}92}{2\sqrt{2}} \cdot 0{,}61 = 0{,}62.$$

6. *Verificarea* coeficientului λ.

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{55{,}7}{27{,}2} = 2{,}04, \qquad (2.11)$$

adică foarte aproape de valoarea estimată în calculul diametrului D.

7. *Geometria miezului.* Pentru valorile lui l_i și D stabilite rezultă o construcție divizată a miezului magnetic.

Se impun orientativ $n_v = 9$ canale de ventilație radială cu lățimea $b_v = 1$ cm.

Deoarece mașina este cu poli aparenți se ia

$$b'_v = 0{,}5 b_v = 0{,}5 \text{ cm}. \qquad (2.12)$$

Conform relației (1.16) rezultă lungimea geometrică

$$l_g = l_i + n_v b'_v = 55{,}7 + 9 \cdot 0{,}5 = 60{,}2 \text{ cm}.$$

Lungimea unui pachet de tole, considerînd că toate pachetele sînt uniforme (vezi fig. 1.8)

$$l_1 = \frac{l_g - n_v b_v}{n_v + 1} = \frac{60.2 - 9 \cdot 1}{9 + 1} = \frac{51{,}2}{10} = 5{,}1 \text{ cm}.$$

Întrucît l_1 se încadrează în limitele admise (4÷6 cm) rezultă că miezul magnetic va avea $n_v = 9$ canale de ventilație cu lățimea $b_v = 1$ cm și $n_v + 1 = 10$ pachete de tole cu lungimea rotunjită $l_1 = 5$ cm.

Recalculînd, rezultă următoarele dimensiuni ale miezului magnetic :

— lungimea fierului miezului magnetic (a tuturor pachetelor) conform relației (1.16 a)

$$l_{Fe} = (n_v + 1) l_1 = 10 \cdot 5 = 50 \text{ cm} ; \qquad (2.13)$$

— lungimea geometrică

$$l_g = l_{Fe} + n_v b_c = 50 + 9 \cdot 1 = 59 \text{ cm} ; \qquad (2.13 \text{ a})$$

— lungimea ideală

$$l_i = l_g - n_v b'_v = 59 - 9 \cdot 0{,}5 = 54{,}5 \text{ cm} \qquad (2.13 \text{ b})$$

care este apropiată de valoarea rezultată cu relația (2.10).

2.3. ÎNFĂȘURAREA ȘI CRESTĂTURILE STATORULUI

1. *Tipul și izolația înfășurării*

Fiind mașini de înaltă tensiune, înfășurarea statorului va fi cu bobine prefabricate — secții rigide, de forma indicată în figura 2.1.

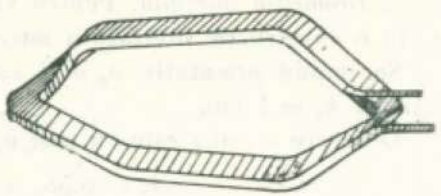


Fig. 2.1 — Secție rigidă pentru înfășurarea de înaltă tensiune în două straturi, crestătura fiind deschisă.

Pentru astfel de înfășurare crestăturile sînt deschise (vezi și tabelul 1.4). Forma crestăturii, modul de dispunere al conductoarelor și de izolare al bobinei în crestătură sînt indicate în figura 1.13 b.

Astfel, în conformitate și cu anexa 7 (fig. 7-II a și tabelul 7-I), pentru clasa de izolație F, schema de izolație a înfășurării este următoarea :

— pe partea activă (în crestătură) : teacă izolantă cu grosimea de 1,8 mm unilaterală ;

— pe partea frontală : bandă izolantă clasă F de 0,15 × 20 mm, în 6 straturi 1/2 suprapuse, peste care se prevede un strat cap la cap, bandă de contracție pentru consolidare ;

— izolația între straturi : sticlotextolit sau liatex grosime de 2 mm.

2. *Numărul de crestături ale statorului*

$$Z_1 = 2mpq = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 = 72 \qquad (2.14)$$

în care s-a ales conform paragrafului 1.4.1

$$q = 4.$$

Considerînd numărul de căi de curent în paralel $a = 1$, se verifică condițiile de simetrie (vezi relațiile (1.19)) :

$$\frac{Z_1}{ma} = \frac{72}{3 \cdot 1} = 24 = \text{număr întreg} ;$$

$$\frac{2p}{a} = \frac{2 \cdot 3}{1} = 6 = \text{număr întreg} ; \qquad (2.15)$$

$$\frac{Z_1}{mt} = \frac{72}{3 \cdot 3} = 8 = \text{număr întreg}$$

unde t = cel mai mare divizor comun (Z_1 ; p) = c.m.m.d.c. (72 ; 3) = 3.

3. *Pasul dentar* al statorului

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 52}{72} = 2{,}26 \text{ cm} \qquad (2.16)$$

se încadrează în limitele (orientative) indicate de relațiile (1.20 a).

4. *Pasul înfășurării*, în conformitate cu relația (1.17) rezultă

$$y_1 = \frac{5}{6} y_z = \frac{5}{6} mq = \frac{5}{6} \cdot 3 \cdot 4 = 10 = \text{număr par} \qquad (2.17)$$

adică $y_1 = 1 - 11$, ceea ce înseamnă că înfășurarea se poate face fie cu bobine egale (n_c = număr par), fie cu bobine neegale (n_c = = număr impar) însă grupate două cîte două (vezi fig. 1.15 c), deoarece $y_1/2 = 5 =$ număr impar.

5. *Factorul de înfășurare al statorului*, valoarea exactă rezultă, din anexa 1, tabelul 1-I

$$k_w = 0{,}926\ ;\ \beta_y = y_1/y_\tau = 5/6 = 0{,}833. \qquad (2.17\ a)$$

6. *Numărul de spire pe fază*, conform relației (1.23)

$$w = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B f_1 k_w \Phi} = \frac{1{,}08 \cdot 3\,637}{4 \cdot 1{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}926 \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-2}} = 258 \text{ spire} \qquad (2.18)$$

$$w = \frac{1{,}055 \cdot 3\,464}{4 \cdot 1{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}926 \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-2}} = 240 \text{ spire}$$

în care conform relației (1.23 a)

$$\Phi = \alpha_i \tau l_i B_\delta = 0{,}61 \cdot 0{,}272 \cdot 0{,}545 \cdot 0{,}8 = 7{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}.$$

7. *Numărul de conductoare efective într-o crestătură*, considerînd o singură cale de curent ($a = 1$), conform relației (1.24) este :

$$n_c = \frac{2maw}{Z_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 258}{72} = 21{,}5. \qquad (2.19)$$

Se iau $n_c = 22$ conductoare/crestătură.

$$n_c = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 240}{72} = 20.$$

Se iau $n_c = 20$ conductoare/crestătură.

8. *Verificări necesare*

a) Numărul real de spire pe fază, conform relației (1.25)

$$w = \frac{Z_1 n_c}{2ma} = \frac{72 \cdot 22}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 264 \text{ spire}. \qquad (2.20)$$

$$w = \frac{72 \cdot 20}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 240 \text{ spire}.$$

b) Verificarea încadrării în limite a păturii de curent conform relației (1.26)

$$A = \frac{n_c I_N}{a t_1} = \frac{22 \cdot 40{,}32}{1 \cdot 2{,}26} = 392{,}4 \text{ A/cm} \qquad (2.21)$$

$$A = \frac{20 \cdot 45.6}{1 \cdot 2{,}26} = 403{,}5 \text{ A/cm}$$

foarte aproape de valoarea aleasă inițial.

c) Fluxul maxim util la sarcină nominală (Φ_N pentru E_{1N}) pe pol, conform relației (1.27 a)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B f_1 w k_w} = \frac{1{,}08 \cdot 3\,637}{4 \cdot 1{,}14 \cdot 50 \cdot 264 \cdot 0{,}926} = 7{,}04 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} = \Phi_N. \qquad (2.22)$$

$$\Phi = \frac{1{,}055 \cdot 3\,464}{4 \cdot 1{,}14 \cdot 50 \cdot 240 \cdot 0{,}926} = 7{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} = \Phi_N,$$

Fluxul nominal la funcționarea în gol (pentru U_{1N}) conform relației (1.27 b)

$$\Phi_{0N} = \frac{\Phi_N}{k_E} = \frac{7{,}04 \cdot 10^{-2}}{1{,}08} = 6{,}51 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}. \qquad (2.22\ a)$$

$$\Phi_{0N} = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{1{,}055} = 6{,}82 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}.$$

Fluxul undei fundamentale pentru tensiunea nominală, conform relației (1.27 e)

$$\Phi_{1N} = \frac{U_{1N}}{\pi\sqrt{2} f_1 w k_w} = \frac{3\,637}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 264 \cdot 0{,}926} = 6{,}7 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}. \qquad (2.22\ b)$$

$$\Phi_{1N} = \frac{3\,464}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 240 \cdot 0{,}926} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}.$$

d) Valoarea maximă a inducției în întrefier conform relației (1.27)

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{7{,}04 \cdot 10^{-2}}{0{,}61 \cdot 0{,}272 \cdot 0{,}545} = 0{,}78 \text{ T} \qquad (2.23)$$

$$B_\delta = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{0{,}61 \cdot 0{,}272 \cdot 0{,}545} = 0{,}796 \text{ T}$$

față de 0,8 T aleasă inițial din curbe, ceea ce înseamnă că dimensionările, pînă în această etapă, sînt bine făcute (D, l_i, w, n_c).

9. *Secțiunea conductorului*

Secțiunea conductorului, conform relației (1.28)

$$s_{Cu1} = \frac{I_N}{a J_1} = \frac{40{,}32}{1 \cdot 6{,}25} = 6{,}45 \text{ mm}^2 \qquad (2.24)$$

$$s_{Cu1} = \frac{45{,}6}{1 \cdot 6{,}25} = 7{,}296 \text{ mm}^2$$

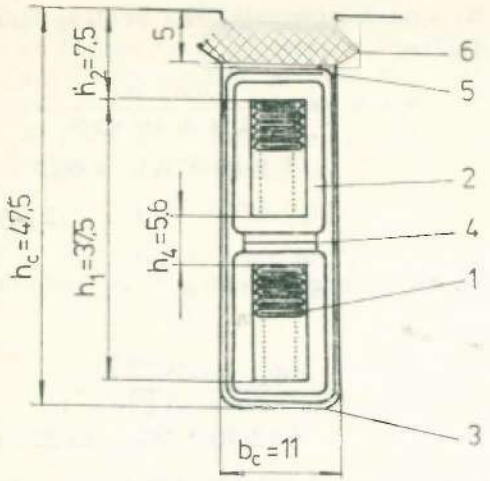


Fig. 2.2 — Secțiune prin crestătura statorului mașinilor sincrone de 440 kVA/400 kW; 6,3/6 kV; 1 000 rot/min (așezarea conductoarelor și izolațiile folosite).

în care densitatea de curent $J_1 = 6{,}25$ A/mm², conform indicațiilor de la paragraful 1.3.1 B.

Pentru înfășurarea de înaltă tensiune se alege conductor profilat, izolat cu email tereftalic și două straturi de fire de sticlă (PE2S) (vezi tabelul 1.4).

10. *Dimensiunile conductorului*, se stabilesc în funcție de dimensiunile crestăturii și de modul de așezare al conductoarelor în crestătură; această așezare, precum și izolațiile folosite în conformitate cu anexa 7, tabelul 7-I, sînt prezentate în figura 2.2.

Materialul, grosimea și numărul de straturi sînt indicate în tabelul 2.1 cu ajutorul căruia se calculează b_{iz} și h_{iz}.

OBSERVAȚIE. După bobinare, înfășurarea se va impregna cu lac clasă de izolație F.

— Lățimea (orientativă) a crestăturii, avînd în vedere relația (1.32), rezultă în limitele:

$$b_c = \beta t_1 = (0{,}4 \div 0{,}5) \cdot 22{,}6 = 9{,}04 \div 11{,}3 \text{ mm},$$

unde β se ia conform relației (1.29).

— Lățimea (orientativă) a conductorului, conform relației (1.33)

$$b_{Cu} = \frac{b_c - b_{iz}}{\text{nr. conductoarelor pe lățimea crestăturii}} = \frac{(9{,}04 \div 11{,}3) - 4{,}3}{1} =$$

$$= (4{,}74 \div 7{,}0) \text{ mm}$$

unde grosimile totale ale izolațiilor, jocului, istmului și penei pe lățime b_{iz} și pe înălțime (generator și motor) h_{iz} se iau din tabelul 2.1.

TABELUL 2.1

Pozițiile, denumirea și dimensiunile materialelor utilizate în crestătura statorului

Poz. din fig. 2.2	Denumirea, grosimea și nr. de straturi utilizate	Grosimea rezultantă		
		Pe lățime (mm)	Pe înălțime (mm)	
			Gen.	Mot.
1	Izolația conductorului (E2S) cu grosimea bilaterală din anexa 6	$1 \times 0{,}45 = 0{,}45$	$22 \times 0{,}45 = 9{,}90$	$20 \times 0{,}45 = 9{,}00$
2	Izolația bobinei pe partea activă (teacă izolantă din samicafoliu sau din bandă izolantă specială)	$2 \times 1{,}8 = 3{,}60$	$4 \times 1{,}8 = 7{,}20$	$4 \times 1{,}8 = 7{,}20$
3	Izolație fund crestătură (gros 0,5 mm)	—	$1 \times 0{,}5 = 0{,}50$	$1 \times 0{,}5 = 0{,}50$
4	Izolație între straturi (sticlotextolit grosime 1 mm = 2 bucăți)	—	$2 \times 1 = 2{,}00$	$2 \times 1 = 2.00$
5	Izolație sub pană (sticlotextolit gros 0,5 mm)	—	$1 \times 0{,}5 = 0{,}50$	$2 \times 0{,}5 = 1{,}00$
6	Pană, sticlotextolit grosime 4 mm	—	4,00	4,00
7	Istmul crestăturii	—	1,00	1,00
8	Joc	0,25	0,30	0,30
		$b_{iz} = 4{,}30$	$h_{iz\,C} = 25{,}40$	$h_{iz\,M} = 25{,}00$

Din STAS 2873-78 (anexa 5) se alege conductor din *CuEm* (cupru electrolitic moale), izolat cu E2S:

CuEm 6,7 × 1 PE2S = 6,48 mm². | *CuEm* 6,7 × 1,12 PE2S = 7,29 mm².

11. *Dimensiunile definitive ale crestăturii* (vezi tabelul 2.1 și fig. 2.2), calculate cu relațiile (1.33 a), rezultă:

— *lățimea* crestăturii

$b_c = b_{Cu} \times$ numărul conductoarelor pe lățimea crestăturii $+ b_{iz} =$
$= 6{,}7 \times 1 + 4{,}3 = 11{,}0$ mm;

— *înălțimea* crestăturii

$h_c = h_{Cu} \times$ numărul conductoarelor pe lățimea crestăturii $+ h_{iz}$

$$h_c = 1 \times 22 + 25{,}4 = 47{,}4 \text{ mm.} \quad \Big| \quad h_c = 1{,}12 \times 20 + 25 = 47{,}4 \text{ mm.}$$

Se stabilește, prin rotunjire, crestătura cu dimensiunile :

$$b_c = 11 \text{ mm} ; \quad h_c = 47{,}5 \text{ mm.} \tag{2.25}$$

Verificări necesare :

a) Inducția în jugul statorului, conform relației (1.34)

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}h'_{j1}} = \frac{7{,}04 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0625} = 1{,}18 \text{ T} \quad \Big| \quad B_{j1} = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0625} = 1{,}212 \text{ T}$$

în care înălțimea jugului statorului, fără canale axiale de ventilație, este dată de relația (1.34 a)

$$h'_{j1} = h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_c = \frac{74 - 52}{2} - 4{,}75 = 6{,}25 \text{ cm.}$$

Întrucît B_{j1} nu se încadrează în limitele impuse în paragraful (1.3.2), trebuie modificată înălțimea jugului prin modificarea diametrului interior. Astfel :

— se impune $B_{j1} = 1{,}45$ T ;

— se calculează

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}B_{j1}} = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}15} = 0{,}0522 \text{ m} = 5{,}22 \text{ cm}$$

— se determină diametrul interior :

$$D = D_e - 2(h_{j1} + h_c) = 74 - 2 \cdot (5{,}22 + 4{,}75) = 54{,}6 \text{ cm.}$$

Se adoptă valoarea

$$D = 54 \text{ cm,} \tag{2.26}$$

pentru care se recalculează următoarele mărimi la valorile definitive (dacă se încadrează în limite solicitările) :

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 54}{2 \cdot 3} = 28{,}2 \text{ cm} ; \tag{2.26 a}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{7{,}04 \cdot 10^{-2}}{0{,}61 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}545} = 0{,}75 \text{ T.} \quad \Big| \quad B_\delta = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{0{,}61 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}545} = 0{,}767 \text{ T.} \tag{2.27}$$

Deoarece inducția maximă în întrefier a scăzut mult sub limită, se impune, de exemplu pentru motor unde valoarea este mai mare, $B_\delta = 0{,}8$ T și rezultă, definitiv

$$l_i = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau B_\delta} = \frac{7{,}2 \cdot 10^{-2}}{0{,}61 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}8} = 0{,}523 \text{ m} = 52{,}3 \text{ cm.}$$

Se ia pentru lungimea ideală valoarea rotunjită

$$l_i = 52{,}5 \text{ cm} \tag{2.28}$$

căreia îi corespunde $B_\delta = 0{,}78$ T pentru generator, și $B_\delta = 0.797 \approx 0{,}8$ T pentru motor, adică în limitele date de relația (1.27 d).

Valoarea definitivă a raportului λ este

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{52{,}5}{28{,}2} = 1.86. \tag{2.29}$$

Miezul magnetic va avea tot 9 canale radiale de 1 cm fiecare și 10 pachete de tole de cîte 4,8 cm fiecare.

Valorile definitive pentru dimensiunile miezului magnetic al statorului vor fi deci :

$$\begin{aligned} l_{Fe} &= (n_c + 1)l_1 = (9 + 1) \cdot 4{,}8 = 48 \text{ cm} ; \\ l_g &= l_{Fe} + n_c b_c = 48 + 9 \cdot 1 = 57 \text{ cm} ; \\ l_i &= l_g - 0{,}5 n_c b'_v = 57 - 0{,}5 \cdot 9 \cdot 1 = 52{,}5 \text{ cm,} \end{aligned} \tag{2.30}$$

iar pentru pasul dentar și pătura de curent vor fi :

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 54}{72} = 2{,}35 \text{ cm} ; \tag{2.31}$$

$$A = \frac{n_c I_N}{a t_1} = \frac{22 \cdot 10{,}32}{1 \cdot 2{,}35} = 378 \text{ A/cm} \quad \Big| \quad A = \frac{20 \cdot 45{,}6}{1 \cdot 2{,}35} = 388 \text{ A/cm} \tag{2.32}$$

adică în limitele indicate de relația (1.26 a).

Valoarea definitivă a inducției în jugul statorului este :

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}h_{j1}} = \frac{7{,}04\cdot10^{-2}}{2\cdot0{,}95\cdot0{,}48\cdot5{,}25\cdot10^{-2}} = 1{,}47 \text{ T} \quad \Big| \quad B_{j1} = \frac{7{,}2\cdot10^{-2}}{2\cdot0{,}95\cdot0{,}48\cdot5{,}25\cdot10^{-2}} = 1{,}5 \text{ T} \qquad (2.33)$$

în care :

$$h'_{j1} = h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_c = \frac{74 - 54}{2} - 4{,}75 = 5{,}25 \text{ cm.}$$

b) Inducția aparentă maximă în dinții statorului, conform relației (1.35) :

$$B'_{d1\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe}l_{Fe}b_{d\min}} = \frac{2{,}35\cdot10^{-2}\cdot0{,}525\cdot0{,}78}{0{,}95\cdot0{,}48\cdot1{,}25\cdot10^{-2}} = 1{,}68 \text{ T} \quad \Big| \quad B'_{d\max} = \frac{2{,}35\cdot10^{-2}\cdot0{,}525\cdot0{,}8}{0{,}95\cdot0{,}48\cdot1{,}25\cdot10^{-2}} = 1{,}73 \text{ T} \qquad (2.34)$$

unde :

$$b_{d\min} = t_1 - b_c = 23{,}5 - 11 = 1{,}25 \text{ cm.}$$

După cum se observă atît B_{j1} cît și $B'_{d\max}$ se înscriu în limitele indicate în paragraful (1.3.2 B).

c) Valoarea exactă a densității de curent conform relației (1.35 b este

$$J_1 = \frac{I_N}{as_{Cu1}} = \frac{40{,}32}{1\cdot6{,}48} = 6{,}22 \text{ A/mm}^2. \quad \Big| \quad J_1 = \frac{45{,}6}{1\cdot7{,}29} = 6{,}25 \text{ A/mm}^2. \qquad (2.35)$$

d) Valorile rapoartelor dimensiunilor constructive :

$$\beta = \frac{b_{c1}}{t_1} = \frac{11}{23{,}5} = 0{,}46 ;$$

$$\beta_1 = \frac{h_c}{\tau} = \frac{4{,}75}{28{,}2} = 0{,}168 ;$$

$$\beta_2 = \frac{h_c}{b_c} = \frac{47{,}5}{11} = 4{,}31$$

sînt apropiate de limitele indicate de relațiile (1.29).

2.4. CALCULUL LĂȚIMII ÎNTREFIERULUI

Lățimea întrefierului se calculează cu relația (1.36)

$$\delta = \frac{0{,}36\cdot10^{-4}A\tau}{k'(x_d - x_{\sigma 1})B_\delta} = \frac{0{,}36\cdot10^{-4}\cdot388\cdot28{,}2}{1{,}07\cdot(1{,}3 - 0{,}12)\cdot0{,}8} = 0{,}38 \text{ cm}$$

unde s-au adoptat următoarele valori :

$k' = 1{,}07$ considerîndu-se jugul rotorului din oțel ;

$x_d = 1{,}3$ u.r. ;

$x_{\sigma 1} = 0{,}12$ u.r.

Se stabilește valoarea rotunjită

$$\delta = 4 \text{ mm.}$$

2.5. DIMENSIONAREA CIRCUITULUI MAGNETIC

Dimensionarea circuitului magnetic al statorului și a întrefierului s-au făcut odată cu stabilirea dimensiunilor principale și a înfășurării indusului, respectiv odată cu calculul lățimii întrefierului.

Deoarece se urmărește ca dimensiunile principale ca generator și motor să fie aceleași, dimensionarea circuitului magnetic al rotorului se face pentru mașina mai solicitată magnetic, adică pentru motor, urmînd ca determinarea solicitărilor magnetice reale pentru dimensiunile stabilite să se facă pentru fiecare mașină în parte, odată cu întocmirea tabelului caracteristicilor magnetice.

2.5.1. DIMENSIUNILE PIESEI POLARE

— *Diametrul exterior al rotorului*, conform relației (1.41)

$$D_r = D - 2\delta = 54 - 2\cdot0{,}4 = 53{,}2 \text{ cm.} \qquad (2.37)$$

— *Lățimea piesei polare* conform relației (1.42) :

$$b_p = \alpha_p\tau = 0{,}7\cdot28{,}2 = 19{,}7 \text{ cm.} \qquad (2.38)$$

— *Raza de formă a polului* conform relației (1.44) :

$$R_p = \frac{D}{2 + \frac{8D(\delta_M - \delta)}{b_p^2}} = \frac{54}{2 + \frac{8\cdot54\cdot(0{,}8 - 0{,}4)}{19{,}7^2}} = 22{,}13 \text{ cm} \qquad (2.39)$$

unde :

$$\delta_M/\delta = 2$$

și deci

$$\delta_M = 2\delta = 2 \cdot 4 = 8 \text{ mm} = 0.8 \text{ cm}.$$

— *Înălțimea piesei polare* conform relației (1.45) :

$$h_p = h'_p + R_p - \sqrt{R_p^2 - \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} = 1{,}5 + 22{,}13 - \sqrt{22{,}13^2 - \left(\frac{19{,}7}{2}\right)^2} = 4 \text{ cm} \qquad (2.40)$$

în care s-a luat, constructiv $h'_p = 1{,}5$ cm.

2.5.2. DIMENSIUNILE POLULUI

— *Lățimea polului* conform relației (1.46)

$$b_m = \frac{\sigma\Phi}{k_{Fem} l_m B_m} = \frac{1{,}15 \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-2}}{0{,}97 \cdot 0{,}59 \cdot 1{,}6} = 0{,}09051 \text{ m} \approx 9 \text{ cm} \qquad (2.41)$$

în care :

— coeficientul de scăpări σ se determină cu relația (1.50)

$$\sigma = 1 + k_\sigma \frac{35\delta}{\tau^2} = 1 + 8{,}5 \cdot \frac{35 \cdot 0{,}4}{28{,}2^2} = 1{,}15$$

unde $k_\sigma = 8{,}5$ pentru $h_p = 4$ cm (vezi tabelul 1.6) ;

— lungimea polului : $l_m = l_g + 2$ cm $= 57 + 2 = 59$ cm ;

— inducția în miezul polului conform paragrafului 1.3.2 B

$$B_m = 1{,}6 \text{ T} ;$$

— $k_{Fem} = 0{,}97$ pentru tole de tablă de $1 \div 2$ mm grosime din care se vor face polii.

— *Înălțimea polului* conform relației (1.52)

$$h_m = (1{,}05 \div 1{,}15) b_m = 1{,}1 \cdot 9 = 9{,}9 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}. \qquad (2.42)$$

OBSERVAȚIE. Valoarea definitivă a înălțimii polului h_m se determină pe cale grafică, la scară, după dimensionarea înfășurării de excitație (vezi ansamblul general — fig. 2.4), secțiunea transversală).

2.5.3. DIMENSIUNILE JUGULUI ROTORULUI

— *Înălțimea jugului rotorului* conform relației (1.54) :

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2 k_{Fem} l_{j2} B_{j2}} = \frac{1{,}15 \ 7{,}2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}7 \cdot 1{,}4} = 0{,}0435 \text{ m} = 4{,}35 \text{ cm} \qquad (2.43)$$

unde :

$$l_{j2} = l_m + (10 \div 20) \text{ cm} = 59 + 11 = 70 \text{ cm} ;$$

$B_{j2} = 1{,}4$ T conform paragrafului 1.3.2 B.

— *Diametrul interior al rotorului* conform relației (1.56)

$$D_{ir} = D - 2(\delta + h_p + h_m + h_{j2}) = 54 - 2 \cdot (0{,}4 + 4 + 10 + 4{,}35) = 16{,}5 \text{ cm}. \qquad (2.44)$$

Din motive mecanice, din STAS 3432/1-74 se ia pentru cuplul nominal determinat cu relația (1.189 c)

$$M_N = 956 \frac{P_N}{n_1} = 956 \cdot \frac{400}{1\,000} = 382 \text{ daNm} = 3\,820 \text{ Nm},$$

diametrul capătului arborelui $d = 120$ mm. În funcție de acesta se determină diametrul maxim al arborelui care este cu $20 \div 30\%$ mai mare și care este chiar D_{ir} (vezi fig. 2.4 secțiunea transversală) adică

$$D_{ir} = d_{\text{maxarbore}} \approx 1{,}25 d = 15 \text{ cm} \qquad (2.44 \text{ a})$$

pentru care se vor recalcula h_{j2} și B_{j2} (vezi paragraful 2.8.1, relațiile (2.71 a și b)).

2.6. DIMENSIONAREA ÎNFĂȘURĂRII DE AMORTIZARE

— *Secțiunea totală a barelor pe pol* conform relației (1.74)

$$\Sigma s_a = (0{,}15 \div 0{,}3) \frac{A\tau}{J_1} = (0{,}15 \div 0{,}3) \cdot \frac{388 \cdot 28{,}2}{6{,}25} = 262{,}5 \div 525 \text{ mm}^2. \qquad (2.45)$$

— *Pasul crestăturii înfășurării de amortizare* conform paragrafului 1.7 se ia astfel încît să satisfacă relația (1.75 a), atît pentru generator cît și pentru motor

$$t_a = 1{,}75 \text{ cm}$$

în care

$$k = 7.$$

— *Numărul de bare pe pol*, conform relației (1.76)

$$n_a = \frac{b_p - t_a}{t_a} = \frac{19{,}7 - 1{,}75}{1{,}75} = 10{,}25. \qquad (2.46)$$

Se adoptă

$$n_a = 10.$$

Pasul t_a se menține la valoarea $t_a = 1{,}75$ cm, urmînd ca dsitanțele de la extremitățile piesei polare să fie ceva mai mari decît $t_a/2$ (distanță considerată în relația (1.76)).

— *Secțiunea unei bare de amortizare* conform relației (1.77)

$$s_a = \frac{\Sigma s_a}{n_a} = \frac{262{,}5 \div 525}{10} = 26{,}25 \div 52{,}5 \text{ mm}^2. \qquad (2.47)$$

— *Diametrul barei de amortizare* conform relației (1.77), considerînd barele rotunde

$$d_a = \sqrt{\frac{4s_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (26{,}25 \div 52{,}5)}{\pi}} = 5{,}77 \div 8{,}17 \text{ mm}.$$

(2.47 a)

Din anexa 8, pentru o amortizare mai bună ca generator și o pornire corespunzătoare ca motor, se ia valoarea $d_a = 8$ mm. Pentru generator barele sînt din cupru iar pentru motor din alamă.

Pentru $d_a = 8$ mm rezultă

$$s_a = \frac{\pi d_a^2}{4} = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 50{,}24 \text{ mm}^2. \qquad (2.47 \text{ b})$$

Se adoptă, pentru istmul crestăturii valorile : $h_0 = b_0 = 2{,}5$ mm.

— *Secțiunea transversală a inelului* de scurtcircuitare, conform relației (1.78) :

$$s_i = (0{,}4 \div 0{,}5) s_a n_a = (0{,}4 \div 0{,}5) \cdot 50{,}24 \cdot 10 = 200{,}9 \div 251{,}2 \text{ mm}^2.$$

(2.48)

Se adoptă din anexa 5 tabelul 5-III, pentru inelul de scurtcircuitare, bară din cupru cu dimensiunile

$$6 \times 40 = 239 \text{ mm}^2. \qquad (2.48 \text{ a})$$

2.7. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII INDUSULUI

După cum s-a menționat, înfășurarea statorului fiind pentru înaltă tensiune, este construită din conductor profilat, în două straturi, cu bobine izolate (secții rigide).

— *Lungimea frontală a bobinei* statorului, se determină efectuînd la scară construcția grafică indicată în figura 1.21. Valorile dimensiunilor constructive sînt luate din tabelul 1.8.

Pentru construcția grafică s-au folosit deci următoarele valori :

$$l_{1med} = \frac{\pi(D + h_c)}{Z_1} = \frac{\pi \cdot (54 + 4{,}75)}{72} = 2{,}56 \text{ cm} ;$$

$$y_1 = 10 \text{ (vezi relația (2.17))} ;$$

$$a = 4 \text{ cm} ;$$

$$r = 3{,}5 \text{ cm} ; \qquad (2.49)$$

$$r_1 = 1 \text{ cm} ;$$

$$\Delta_{iz} = 0.5 \text{ cm} = 5 \text{ mm} ;$$

$$y_1 l_{1med} = 10 \cdot 2{,}56 = 25{,}60 \text{ cm}.$$

Din construcția la scară și conform relației (1.83), lungimea frontală a bobinei stator măsurată pe vederea desfășurată din stînga figurii (vezi fig. 1.21), rezultă :

$$l_{f1} = l_{ABCDEF} = 2(a + l_{BC}) + \pi r_{med} = 2 \cdot (0{,}04 + 0{,}22) + \\ + \pi \cdot 0{,}021 = 0{,}585 \text{ m} = 58{,}5 \text{ cm}. \qquad (2.50)$$

— *Lungimea medie* a unei jumătăți de spiră a înfășurării statorului, conform relației (1.81) :

$$l_{wmed} = l_g + l_{f1} = 57 + 58{,}5 = 115{,}5 \text{ cm} = 1{,}155 \text{ m} \qquad (2.51)$$

1. *Rezistența pe fază a înfășurării statorului*, se calculează cu relația (1.79)

$$r_1 = k_r \frac{R_1 I_N}{U_{1N}} = 1 \cdot \frac{2{,}31 \cdot 40{,}32}{3\,637} = 0{,}0256 \text{ u.r.} \qquad r_1 = 1 \cdot \frac{1{,}87 \cdot 45{,}6}{3\,464} = 0{,}0246 \text{ u.r.} \tag{2.52}$$

în care :

$$k_r = 1 ;$$

$$R_1 = \rho \frac{L_1}{s_{Cu1} a} = 1{,}38 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{609}{6{,}48 \cdot 1} = 2{,}31 \ \Omega \qquad R_1 = 1{,}38 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{554}{7{,}29 \cdot 1} = 1{,}87 \ \Omega \tag{2.52 a}$$

unde :

$$L_1 = 2wl_{w\,med} = 2 \cdot 264 \cdot 1{,}155 = 609 \text{ m.} \qquad L_1 = 2 \cdot 240 \cdot 1{,}155 = 554 \text{ m.} \tag{2.52 b}$$

— *Permeanța specifică a scăpărilor în crestătură*, conform relației (1.86 a) și figurii 2.2.

$$\lambda_{c1} = \frac{h_1 - h_1}{3b_c} k_\beta + \frac{h_2}{b_c} k'_\beta + \frac{h_1}{4b_c} = \frac{37{,}5 - 5{,}6}{3 \cdot 11} \cdot 0{,}906 + \frac{7{,}45}{11} \cdot 0{,}875 + \frac{5{,}6}{4 \cdot 11} = 1{,}59 \qquad \lambda_{c1} = \frac{37 - 5{,}6}{3 \cdot 11} \cdot 0{,}906 + \frac{7{,}95}{11} \cdot 0{,}875 + \frac{5{,}6}{4 \cdot 11} = 1{,}62 \tag{2.53}$$

în care conform relațiilor (1.87 a).

$$k'_\beta = \frac{1 + 3\beta_y}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0{,}833}{4} = 0{,}875 ; \tag{2.53 a}$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} k'_\beta = 0{,}25 + 0{,}75 \cdot 0{,}875 = 0{,}906.$$

— *Permeanța specifică a scăpărilor diferențiale*, se calculează conform indicațiilor de la paragraful 1.8, punctul 2, care prezintă o metodă precisă de determinare a acestor scăpări.

Conform relației (1.90) pentru înfășurarea statorului :

$$\lambda_{d1} = 0{,}9 \frac{t_1 (q k_u)^2 \rho_{d1} k_{\sigma 1}}{k_C \delta} \sigma_{d1} = 0{,}9 \cdot \frac{2{,}35 \cdot (4 \cdot 0{,}926)^2 \cdot 1 \cdot 0{,}95}{1{,}2 \cdot 0{,}4} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} = 0{,}344 \tag{2.54}$$

în care :

$$k_C = k_{C1} k_{C2} = 1{,}19 \cdot 1{,}01 = 1{,}20$$

unde :

$$k_{C1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{2{,}35}{2{,}35 - 0{,}97 \cdot 0{,}4} = 1{,}19$$

cu

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_s}{\delta}} = \frac{\left(\frac{11}{4}\right)^2}{5 + \frac{11}{4}} = 0{,}97 ; \tag{2.54 a}$$

$$k_{C2} = \frac{t_a}{t_a - \gamma_2 \delta} = \frac{1{,}75}{1{,}75 - 0{,}069 \cdot 0{,}4} = 1{,}01$$

cu

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_a}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_a}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2{,}5}{4}\right)}{5 + \frac{2{,}5}{4}} = 0{,}069 ;$$

$$k_{\sigma 1} = 1 - 0{,}033 \frac{a_s^2}{\delta t_1} = 1 - 0{,}033 \cdot \frac{1{,}1^2}{0{,}4 \cdot 2{,}35} = 0{,}95$$

(vezi relația(1.91)) ;

$$\rho_{d1} = 1 ;$$

$\sigma_{d1} = 0{,}6 \cdot 10^{-2}$ pentru $q = \frac{72}{3 \cdot 2 \cdot 3} = 4$ și $y_1 = \frac{5}{6} y_\tau$,

din figura 1.24.

Permeanța specifică a scăpărilor prin capetele dinților conform relației (1.92)

$$\lambda_{z1} = \frac{5 \frac{\delta}{a_s}}{5 + 4 \frac{\delta}{a_s}} \cdot \frac{3\beta_y + 1}{4} = \frac{5 \cdot \frac{0{,}4}{1{,}1}}{5 + 4 \cdot \frac{0{,}4}{1{,}1}} \cdot \frac{3 \cdot 0{,}833 + 1}{4} = 0{,}246. \tag{2.55}$$

Permeanța specifică a scăpărilor în părțile frontale, conform relației (1.95) :

$$\lambda_{f1} = 0{,}34\frac{q}{l_i}(l_{f1} - 0{,}64\beta_y\tau) =$$

$$= 0{,}34\cdot\frac{4}{52{,}5}\cdot(58{,}5 - 0{,}64\cdot 0{,}833\cdot 28{,}2) = 1{,}12. \qquad (2.56)$$

Permeanța specifică totală a înfășurării statorului, conform relației (1.86) :

$$\Sigma\lambda_1 = \lambda_{c1} + \lambda_{d1} + \lambda_{z1} + \lambda_{f1} = \quad | \quad \Sigma\lambda_1 = 1{,}62 + 0{,}344 + 0{,}246 +$$

$$= 1{,}59 + 0{,}344 + 0{,}246 + \quad | \quad + 1{,}12 = 3{,}33.$$

$$+ 1{,}12 = 3{,}3. \qquad (2.57)$$

Reactanța de scăpări pe fază a înfășurării statorului, conform relației (1.84)

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} I_N}{U_{1N}} = \frac{7{,}95\cdot 40{,}32}{3\,637} = \quad | \quad x_{\sigma 1} = \frac{6{,}63\cdot 45{,}6}{3\,464} = 0{,}087 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}088 \text{ u.r.} \qquad (2.58)$$

în care conform relației (1.85) :

$$X_{\sigma 1} = 0{,}158\left(\frac{f_1}{100}\right)\left(\frac{w}{100}\right)^2\frac{l_i}{pq}\Sigma\lambda_1 = \quad | \quad X_{\sigma 1} = 0{,}158\cdot\left(\frac{50}{100}\right)\cdot\left(\frac{240}{100}\right)^2\cdot\frac{52{,}5}{3\cdot 4}\cdot$$

$$= 0{,}158\cdot\left(\frac{50}{100}\right)\cdot\left(\frac{264}{100}\right)^2\cdot\frac{52{,}5}{3\cdot 4}\cdot \quad | \quad \cdot 3{,}33 = 6{,}63\ \Omega.$$

$$\cdot 3{,}3 = 7{,}95\ \Omega. \qquad (2.58\text{ a})$$

3. *Reactanța utilă (nesaturată) corespunzătoare fluxului de reacție longitudinală a indusului* conform relației (1.96) :

$$x_{ad} = \frac{k_{ad}F_a}{k'U_{m\delta 0}} = \frac{0{,}875\cdot 8\,871}{1{,}07\cdot 5\,531} = \quad | \quad x_{ad} = \frac{0{,}875\cdot 9\,120}{1{,}07\cdot 5823} = 1{,}28 \text{ u.r.}$$

$$= 1{,}31 \text{ u.r.} \qquad (2.59)$$

în care :
conform relației (1.97) :

$$F_a = 0{,}9m\frac{mk_w}{p}I_N = \quad | \quad F_a = 0{,}9\cdot 3\cdot\frac{240\cdot 0{,}926}{3}\cdot 45{,}6 =$$

$$= 0{,}9\cdot 3\cdot\frac{264\cdot 0{,}926}{3}\cdot 40{,}32 = \quad | \quad = 9\,120 \text{ A};$$

$$= 8\,871 \text{ A}; \qquad (2.59 \text{ a})$$

$$U_{m\delta 0} = 2\cdot\frac{B_\delta}{k_E\mu_0}k_C\delta = \quad | \quad U_{m\delta 0} = 2\cdot\frac{0.8}{1{,}055\cdot 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}}\cdot$$

$$= 2\cdot\frac{0.78}{1{,}08\cdot 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}}\cdot 1{,}2\cdot 4\cdot 10^{-3} = \quad | \quad \cdot 1{,}2\cdot 4\cdot 10^{-3} = 5\,823 \text{ A};$$

$$= 5\,531 \text{ A}; \qquad (2.59 \text{ b})$$

$k_{ad} = 0{,}875$ din figura 1.29 pentru $\alpha_p = 0{,}7$; $\delta_M/\delta = 2$;

$$\delta/\tau = \frac{0.4}{28{,}2} = 0{,}0142 ;$$

$$k' = 1{,}07.$$

4. *Reactanța utilă (nesaturată) corespunzătoare fluxului de reacție transversală a indusului*, conform relației (1.99)

$$x_{aq} = \frac{k_{aq}F_a}{U_{m\delta 0}}\cdot\frac{1 + k_C}{2} = \quad | \quad x_{aq} = \frac{0{,}4\cdot 9\,120}{5\,823}\cdot\frac{1 + 1{,}2}{2} =$$

$$= \frac{0{,}4\cdot 8\,871}{5\,531}\cdot\frac{1 + 1{,}2}{2} = 0{,}705 \text{ u.r.} \quad | \quad = 0{,}69 \text{ u.r.} \qquad (2.60)$$

unde :

$k_{aq} = 0{,}4$ din figura 1.29.

5. *Reactanța sincronă longitudinală* conform relației (1.104)

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma 1} = 1{,}31 + \quad | \quad x_d = 1{,}28 + 0{,}087 = 1{,}37 \text{ u.r.}$$

$$+ 0{,}088 = 1{,}4 \text{ u.r.} \qquad (2.61)$$

6. *Reactanța sincronă transversală*, conform relației (1.104 a)

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma 1} = 0{,}705 + \quad | \quad x_q = 0{,}69 + 0{,}087 \approx$$

$$+ 0{,}088 \approx 0{,}8 \text{ u.r.} \quad | \quad \approx 0{,}78 \text{ u.r.} \qquad (2.62)$$

7. *Reactanța homopolară*, conform relației (1.105)

$$x_0 = \frac{\pi\mu_0 F_c l_\delta}{k_w^2 \Phi_{1N}} \cdot \frac{2p}{Z_1}(\lambda_{c0} + \lambda_{f0}) + 4 \cdot \frac{0{,}5 x_{ad}}{k_{cd} k_w^2}(\beta_y - 2/3) \cdot \left[\left(\frac{2p}{Z_1}\right)^2 + 1/27 + 7/18(\beta_y - 2/3) - (\beta_y - 2/3)^2\right] =$$

$$= \frac{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8\,871 \cdot 0{,}525}{0{,}926^2 \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{2 \cdot 3}{72} \cdot (1{,}07 + 0{,}392) + 4 \cdot \frac{0{,}5 \cdot 1{,}31}{0{,}875 \cdot 0{,}926^2} \cdot (0{,}833 - 2/3) \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot 3}{72}\right)^2 + 1/27 + 7/18 \cdot (0{,}833 - 2/3) - (0{,}833 - 2/3)^2\right] = 0{,}0853 \text{ u.r.}$$

$$x_0 = \frac{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9\,120 \cdot 0{,}525}{0{,}926^2 \cdot 7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{2 \cdot 3}{72} \cdot (1{,}08 + 0{,}392) + 4 \cdot \frac{0{,}5 \cdot 1{,}28}{0{,}875 \cdot 0{,}926^2} \cdot (0{,}833 - 2/3) \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot 3}{72}\right)^2 + \frac{1}{27} + \frac{7}{18} \cdot (0{,}833 - 2/3) - (0{,}833 - 2/3)^2\right] = 0{,}0847 \text{ u.r.}$$

(2.63)

unde conform relațiilor (1.104 a), (1.105 b) rezultă :

$$\lambda_{c0} = \frac{1}{b_c}\left[(3\beta_y - 2)h_2 + (9\beta_y - 5)\frac{h_1}{12} - (9\beta_y - 8)\frac{h_4}{12}\right] = \frac{1}{11} \cdot \left[(3 \cdot 0{,}833 - 2) \cdot 7{,}45 + (9 \cdot 0{,}833 - 5) \cdot \frac{37{,}5}{12} - (9 \cdot 0{,}833 - 8) \cdot \frac{5{,}6}{12}\right] = 1{,}07 ;$$

$$\lambda_{f0} = (0{,}2 \div 0{,}5)\lambda_{f1} = 0{,}35 \cdot \lambda_{f1} = 0{,}35 \cdot 1{,}12 = 0{,}392.$$

$$\lambda_{c0} = \frac{1}{11} \cdot \left[(3 \cdot 0{,}833 - 2) \cdot 7{,}95 + (9 \cdot 0{,}833 - 5) \cdot \frac{37}{12} - (9 \cdot 0{,}833 - 8) \cdot \frac{5{,}6}{12}\right] = 1{,}08 ;$$

$$\lambda_{f0} = 0{,}35 \cdot 1{,}12 = 0{,}392.$$

2.8. CARACTERISTICILE MAGNETICE ȘI SOLENAȚIA DE EXCITAȚIE LA SARCINĂ NOMINALĂ

2.8.1. TENSIUNILE MAGNETICE ȘI TENSIUNEA MAGNETOMOTOARE LA t.e.m. NOMINALĂ

— *T.m. a întrefierului principal* pe o pereche de poli, conform relației (1.107)

$$U_{m\delta} = 2\frac{B_\delta}{\mu_0} k_C \delta = 2 \cdot \frac{0{,}78}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}20 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 5\,990 \text{ A.}$$

$$U_{m\delta} = 2 \cdot \frac{0{,}8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}20 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 6\,144 \text{ A.}$$

(2.64)

— *T.m. a dinților indusului pentru o pereche de poli*

a) Lățimile dintelui în cele trei secțiuni, conform relațiilor (1.110)

$$b_{d\min} = t_1 - b_{c1} = 2{,}35 - 1{,}1 = 1{,}25 \text{ cm} ;$$

$$b_{d\,med} = \frac{\pi(D + h_{c1})}{Z_1} - b_{c1} = \frac{\pi \cdot (54 + 4{,}75)}{72} - 1{,}1 = 1{,}46 \text{ cm} ;$$

$$b_{d\max} = \frac{\pi(D + 2h_{c1})}{Z_1} - b_{c1} = \frac{\pi \cdot (54 + 2 \cdot 4{,}75)}{72} - 1{,}1 = 1{,}66 \text{ cm.}$$

b) Inducțiile aparente în cele trei secțiuni ale dintelui, conform relațiilor (1.110)

$$B'_{d\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-2}} = 1{,}68 \text{ T} ;$$

$$B'_{d\,med} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}46 \cdot 10^{-2}} = 1{,}44 \text{ T} ;$$

$$B'_{d\min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\max}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-2}} = 1{,}27 \text{ T} ;$$

$$B'_{d\max} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}8}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-2}} = 1{,}73 \text{ T} ;$$

$$B'_{d\,med} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}8}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}46 \cdot 10^{-2}} = 1{,}48 \text{ T} ;$$

$$B'_{d\min} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}525 \cdot 0{,}8}{0{,}95 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-2}} = 1{,}3 \text{ T.}$$

(2.65)

c) Întrucît toate inducțiile sînt mai mici decît 1,8 T, din anexa 2, pentru inducțiile de mai sus rezultă :

$H_{d\,max} = 80$ A/cm ; | $H_{d\,max} = 95$ A/cm ;

$H_{d\,med} = 14$ A/cm ; | $H_{d\,med} = 18$ A/cm ;

$H_{d\,min} = 6{,}5$ A/cm ; | $H_{d\,min} = 7$ A/cm.

Valoarea medie a intensității cîmpului magnetic conform relației (1.111)

$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{d\,max} + 4H_{d\,med} +$ | $H_{d1} = \frac{1}{6}(95 + 4 \cdot 18 + 7) =$

$+ H_{d\,min}) = \frac{1}{6} \cdot (80 + 4 \cdot 14 +$ | $= 29$ A/cm.

$+ 6{,}5) = 23{,}8$ A/cm.

T.m. a dinților conform relației (1.109) este

$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1} = 2 \cdot 4{,}75 \cdot$ | $U_{md1} = 2 \cdot 4{,}75 \cdot 29 =$

$\cdot 23{,}8 = 226$ A ; | $= 275{,}5$ A. (2.66)

— *T.m. a jugului statorului pentru o pereche de poli*

a) Lungimea medie a liniei de cîmp

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (74 - 5{,}25)}{2 \cdot 3} = 36 \text{ cm.}$$

b) Din anexa 2, avînd în vedere valorile inducțiilor în jug (vezi relația (2.33)), rezultă :

pentru $B_{j1} = 1{,}47$ T $\Rightarrow$ | pentru $B_{j1} = 1{,}5$ T $\Rightarrow$

$H_{j1} = 17$ A/cm. | $H_{j1} = 20$ A/cm.

T.m. a jugului statorului, conform relației (1.113) este

$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1} = 0{,}38 \cdot 36 \cdot$ | $\cdot U_{mj1} = 0{,}38 \cdot 36 \cdot 20 =$

$\cdot 17 = 232$ A | $= 273$ A (2.67)

unde $\zeta_1 = 0{,}38$ din figura 1.31.

— *T.m. a polului pentru o pereche de poli*

a) Coeficientul de scăpări al rotorului, conform relației (1.48)

$\sigma = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} = 1 + \frac{0{,}786 \cdot 10^{-2}}{7{,}04 \cdot 10^{-2}} =$ | $\sigma = 1 + \frac{0{,}816 \cdot 10^{-2}}{7{,}2 \cdot 10^{-2}} =$

$= 1{,}11$ | $= 1{,}11$ (2.68)

în care, cu relația (1.49) :

$\Phi_\sigma = U_{m\delta dj1}\lambda_{sc} =$ | $\Phi_\sigma = 6\,692 \cdot 12{,}2 \cdot 10^{-7} =$

$= 6\,448 \cdot 12{,}2 \cdot 10^{-7} =$ | $= 0{,}816 \cdot 10^{-2}$ Wb

$= 0{,}786 \cdot 10^{-2}$ Wb (2.68 a)

cu :

$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} +$ | $U_{m\delta dj1} = 6\,144 + 275{,}5 +$

$+ U_{mj1} = 5\,990 + 226 +$ | $+ 273 \approx 6\,692$ A

$+ 232 = 6\,448$ A (2.68 b)

și conform relației (1.49 a)

$$\lambda_{sc} = \lambda_m + \lambda_p = 8{,}1 \cdot 10^{-7} + 4{,}09 \cdot 10^{-7} \approx 12{,}2 \cdot 10^{-7}$$

unde :

$$\lambda_m = 2\mu_0 l_m \left[\frac{h_m}{2c_m} + \frac{h_m}{\pi l_m} \ln\left(1 + \frac{\pi b_m}{2c_m}\right)\right] =$$

$$= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}59 \cdot \left[\frac{10}{2 \cdot 10} + \frac{10}{\pi \cdot 59} \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot 9}{2 \cdot 10}\right)\right] = 8{,}1 \cdot 10^{-7} \quad (2.68\text{ c})$$

și în care, deoarece $2p = 6$, pentru c_m se poate folosi relația (1.49 c)

$$c_m = \frac{\pi\sqrt{[D - (2\delta + 2h_p + h_m)]^2 + b_m^2}}{2p} - b_m =$$

$$= \frac{\pi\sqrt{[54 - (2 \cdot 0{,}4 + 2 \cdot 4 + 10)]^2 + 9^2}}{2 \cdot 3} - 9 = 10 \text{ cm ;}$$

$$\lambda_p = 2\mu_0 l_p \left[\frac{h'_p}{c_p} + \frac{2h_{pm}}{\pi l_p} \ln\left(1 + \frac{\pi b_p}{2c_p}\right)\right] =$$

$$= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}59 \cdot \left[\frac{1{,}5}{6{,}83} + \frac{2 \cdot 3{,}16}{\pi \cdot 59} \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot 19{,}7}{2 \cdot 6{,}83}\right)\right] = 4{,}09 \cdot 10^{-7} \quad (2.68\text{ d})$$

în care, deoarece $2p = 6$, cu relația (1.49 b)

$$c_p = \frac{\pi\sqrt{[D-(2\delta+2h_p)+h'_p]^2+h_p^2}}{2p} - b_p =$$

$$= \frac{\pi\sqrt{[54-(2\cdot0{,}4+2\cdot4)+1{,}5]^2+19{,}7^2}}{2\cdot3} - 19{,}7 = 6{,}83 \text{ cm};$$

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3} = \frac{2\cdot4+1{,}5}{3} = 3{,}16 \text{ cm}.$$

OBSERVAȚII. 1. Se constată că σ ales inițial ($\sigma = 1{,}15$), diferă de cel calculat.

2. Pentru $2p < 6$, c_m și c_p se iau din desenul la scară al rotorului, nu se mai calculează cu relațiile (1.49 b și c).

b) Cele trei valori ale inducției magnetice în corpul polului, conform relațiilor (1.114 b) sînt :

$$B_{m\,max} = \frac{\sigma\Phi}{k_{Fem} l_m b_m} =$$

$$= \frac{1{,}11\cdot7{,}04\cdot10^{-2}}{0{,}97\cdot0{,}59\cdot0{,}09} = 1{,}51 \text{ T};$$

$$B_{m\,min} =$$

$$= B_{m\,max}\frac{(\sigma-1)\frac{\lambda_p}{\lambda_{se}}+1}{\sigma} =$$

$$= 1{,}51\cdot\frac{(1{,}11-1)\cdot\frac{4{,}09\cdot10^{-7}}{12{,}2\cdot10^{-7}}+1}{1{,}11} =$$

$$= 1{,}41 \text{ T};$$

$$B_{m\,med} = B_{m\,min} +$$

$$+\frac{3}{4}(B_{m\,max} - B_{m\,min}) =$$

$$= 1{,}41 + \frac{3}{4}\cdot(1{,}51 - 1{,}41) =$$

$$= 1{,}48 \text{ T}.$$

$$B_{m\,max} = \frac{1{,}11\cdot7{,}2\cdot10^{-2}}{0{,}97\cdot0{,}59\cdot0{,}09} =$$

$$= 1{,}55 \text{ T};$$

$$B_{m\,min} =$$

$$= 1{,}55\cdot\frac{(1{,}11-1)\cdot\frac{4{,}09\cdot10^{-7}}{12{,}2\cdot10^{-7}}+1}{1{,}11} =$$

$$= 1{,}44 \text{ T};$$

$$B_{m\,med} = 1{,}44 +$$

$$+\frac{3}{4}\cdot(1{,}55 - 1{,}44) = 1{,}52 \text{ T}.$$

(2.69)

Corespunzător inducțiilor de mai sus, din anexa 3 rezultă intensitățile cîmpului magnetic :

$H_{m\,max} = 24{,}5$ A/cm ;
$H_{m\,min} = 15{,}3$ A/cm ;
$H_{m\,med} = 20{,}1$ A/cm.

$H_{m\,max} = 30{,}5$ A/cm ;
$H_{m\,min} = 17$ A/cm.
$H_{m\,med} = 26{,}6$ A/cm ;

Valoarea medie a intensității cîmpului magnetic, conform relației (1.114 a) rezultă

$$H_m = \frac{1}{6}(H_{m\,max} + 4H_{m\,med} + H_{m\,min}) = \frac{1}{6}\cdot(24{,}5 + 4\cdot20{,}1 + 15{,}3) = 20 \text{ A/cm}.$$

$$H_m = \frac{1}{6}\cdot(30{,}5 + 4\cdot26{,}6 + 17) = 25{,}6 \text{ A/cm}.$$

T.m. a polului, conform relației (1.114), rezultă

$$U_{mm} = 2(h_m + h_p)H_m = 2\cdot(10+4)\cdot20 = 560 \text{ A}.$$

$$U_{mm} = 2\cdot(10+4)\cdot25{,}6 = 716 \text{ A}. \quad (2.69\text{ a})$$

— *T.m. a întrefierului de îmbinare*, dintre pol și jugul rotorului pentru o pereche de poli, conform relației (1.115) este

$$U_{m\,\delta imb} = 2\frac{B_{m\,max}}{\mu_0}\delta_{imb} = 2\cdot\frac{1{,}51}{4\cdot\pi\cdot10^{-7}}\cdot0{,}15\cdot10^{-3} = 362 \text{ A}$$

unde :

$B_{m\,max} = 1{,}51$ T ;

$$U_{m\,\delta imb} = 2\cdot\frac{1{,}55}{4\cdot\pi\cdot10^{-7}}\cdot0{,}15\cdot10^{-3} = 372 \text{ A} \quad (2.70)$$

$B_{m\,max} = 1{,}55$ T ;

$\delta_{imb} = 0{,}015$ cm $= 0{,}15\cdot10^{-3}$ m, jugul rotorului fiind din tole de tablă din oțel.

— *T.m. a jugului rotorului pentru o pereche de poli*

a) Lungimea medie a liniei de cîmp în jugul rotorului, conform relației (1.134) este

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_{ir} + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi\cdot(15+5)}{2\cdot3} = 10{,}5 \text{ cm} \quad (2.71)$$

în care, pentru $D_{ir} = 15$ cm (vezi relația (2.44 a)), înălțimea recalculată a jugului este

$$h_{j2} = \frac{D - [D_{ir} + 2(\delta + h_p + h_m)]}{2} = \frac{54 - [15 + 2\cdot(0{,}4 + 4 + 10)]}{2} = 5 \text{ cm}. \quad (2.71\ a)$$

b) Inducția magnetică în jugul rotorului (valoarea exactă) conform relației (1.132)

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2k_{Fem}l_{j2}h_{j2}} = \frac{7{,}04\cdot10^{-2} + 0{,}786\cdot10^{-2}}{2\cdot0{,}97\cdot0{,}7\cdot0{,}05} = 1{,}15 \text{ T} \quad | \quad B_{j2} = \frac{7{,}2\cdot10^{-2} + 0{,}816\cdot10^{-2}}{2\cdot0{,}97\cdot0{,}7\cdot0{,}05} = 1{,}18 \text{ T} \quad (2.71\ b)$$

pentru care din anexa 3 se găsește

$H_{j2} = 7{,}6$ A/cm. | $H_{j2} = 8{,}08$ A/cm.

c) T.m. a jugului rotor, conform relației (1.131) este

$$U_{mj2} = L_{j2}H_{j2} = 10{,}5\cdot7{,}6 = 80 \text{ A}. \quad | \quad U_{mj2} = 10{,}5\cdot8{,}08 = 85 \text{ A}. \quad (2.71\ c)$$

T.m. a rotorului

$$U_{mR} = U_{mm} + U_{m\delta imb} + U_{mj2} = 560 + 362 + 80 = 1\,002 \text{ A}. \quad | \quad U_{mR} = 716 + 372 + 85 = 1\,173 \text{ A}. \quad (2.72)$$

T.m.m. pentru t.e.m. nominală

$$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta j1} + U_{mR} = 6\,448 + 1\,002 = 7\,450 \text{ A}. \quad | \quad \Sigma U_{mi} = 6\,692 + 1\,173 = 7\,865 \text{ A}. \quad (2.73)$$

2.8.2. CONSTRUCȚIA CARACTERISTICILOR MAGNETICE ȘI DETERMINAREA SOLENAȚIEI DE EXCITAȚIE NOMINALĂ

A. Caracteristicile magnetice

Se construiesc pe baza indicațiilor de la punctul 1.9.2 A întocmind tabelul 2.2. Cu datele din tabelul 2.2 se construiesc:

a) Caracteristica magnetică la funcționarea în gol

$$\Phi = f(\Sigma U_{mi});$$

TABELUL 2.2

Relația \ $E = \frac{E}{U_{iNM}}$	u.r.	0,55	0,85	$1(U_{iNM})$	(U_{iNG})	$k_E(E_{NM})$	1,23	1,3
	V	1965,2	2 944,4	3 464	3 637	3 654	4 260,7	4 503,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi = \frac{E}{4\,k_B f_1 w k_w}$	Wb	$3{,}75\cdot10^{-2}$	$5{,}8\cdot10^{-2}$	$6{,}82\cdot10^{-2}$	$6{,}51\cdot10^{-2}$	$7{,}2\cdot10^{-2}$	$8{,}4\cdot10^{-2}$	$8{,}86\cdot10^{-2}$
$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i}$	T	0,417	0,644	0,758	0,72	0,8	0,932	0,985
$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_C \delta$	A	3 202	4 950	5 823	5 531	6 144	7 163	7 570
$B'_{d\,max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}}$	T	0,9	1,39	1,64	1,55	1,73	2,01	2,13
$B'_{d\,med} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}}$	T	0,77	1,19	1,40	1,33	1,48	1,72	1,82
$B'_{d\,min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,max}}$	T	0,67	1,04	1,23	1,17	1,30	1,51	1,6
$k_{d1} = \frac{b_e l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,max}} = 0{,}763$; $k_{d2} = \frac{b_e l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}} = 0{,}867$; $k_{d3} = \frac{b_e l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}} = 1{,}01$								
$H_{d\,max}$	A/cm	2	10	52	25	95	300	525
$H_{d\,med}$	A/cm	1,5	5	10	7,5	18	90	125
$H_{d\,min}$	A/cm	1,2	3	5,5	4,3	7	20	37,5

TABELUL 2.2 (continuare)

1	2	3	4	5]	6	7	8	9
$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{dmax} + 4H_{dmed} + H_{dmin})$	A/cm	1,53	5,5	16,25	9,88	29	113,3	177
$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1}$	A	14,5	52,5	154,3	93,8	275,5	1 076	1 681
$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}h_{j1}}$	T	0,78	1,207	1,42	1,36	1,5	1,74	1,84
H_{j1}	A/cm	1,3	5,1	12	8	20	100	160
$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1}$ (ζ_1)	A	29 (0,62)	93,6 (0,51)	173 (0,4)	121 (0,42)	273 (0,38)	1 080 (0,3)	1 613 (0,28)
$U_{m\,dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1}$	A	3 245	5 096	6 150	5 746	6 692	9 319	10 864
$\Phi_\sigma = \lambda_{sc} U_{m\delta dj1}$	Wb	$0{,}395 \cdot 10^{-2}$	$0{,}62 \cdot 10^{-2}$	$0{,}75 \cdot 10^{-2}$	$0{,}66 \cdot 10^{-2}$	$0{,}816 \cdot 10^{-2}$	$1{,}136 \cdot 10^{-2}$	$1{,}325 \cdot 10^{-2}$
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma \left(\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi}\right)$	Wb	$4{,}14 \cdot 10^{-2}$ (1,105)	$6{,}42 \cdot 10^{-2}$ (1,106)	$7{,}57 \cdot 10^{-2}$ (1,11)	$7{,}17 \cdot 10^{-2}$ (1,1)	$8{,}01 \cdot 10^{-2}$ (1,11)	$9{,}53 \cdot 10^{-2}$ (1,13)	$10{,}2 \cdot 10^{-2}$ (1,15)
$B_{m\,max} = \frac{\Phi_m}{k_{Fem} b_m l_m}$	T	0,8	1,24	1,46	1,39	1,55	1,85	1,98
$B_{m\,min} = \frac{B_{m\,max}\left[(\sigma - 1)\frac{\lambda_p}{\lambda_{sc}} + 1\right]}{\sigma}$	T	0,75	1,16	1,36	1,3	1,44	1,71	1,8
$B_{m\,med} = B_{m\,min} + \frac{3}{4}(B_{mmax} - B_{mmin})$	T	0,787	1,22	1,43	1,36	1,52	1,81	1,93
H_{mmax}	A/cm	4,05	9,2	18,35	14,5	30,5	148	215

TABELUL 2.2 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_{mmin}	A/cm	3,75	7,75	13	10,8	17	75,3	119
H_{mmed}	A/cm	4	8,8	16,45	13	26,6	124	235
$H_m = \frac{1}{6}(H_{mmax} + 4H_{mmed} + H_{mmin})$	A/cm	3,96	8,69	19,19	12,88	25,6	119,8	212,33
$U_{mm} = 2(h_m + h_p)H_m$	A	111	243	537	361	716	3 354	5 945
$U_{m\,imb} = \frac{2}{\mu_0} B_{mmax}\,\delta_{imb}$	A	191	296	349	332	372	442	473
$B_{j2} = \frac{\Phi_m}{2k_{Fem} l_{j2} h_{j2}}$	T	0,61	0,945	1,114	1,05	1,18	1,40	1,5
H_{j2}	A/cm	3	5,2	7,03	6,3	8,08	14,9	22,7
$U_{mj2} = L_{j2} H_{j2}$	A	32	55	74	66	85	156	238
$U_{mR} = U_{mm} + U_{m\delta imb} + U_{mj2}$	A	334	594	960	759	1 173	3 952	6 656
$\Sigma U_{mt} = U_{m\delta dj1} + U_{mR}$	A	3 579	5 690	7 110	6 505	7 865	13 271	17 520
$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,55	0,85	1	—	1,055	1,23	1,3
$\underset{\sim}{\Phi}_m = \Phi_m/\Phi_{0N}$	u.r.	0,6	0,94	1,11	—	1,17	1,39	1,49

TABELUL 2.2 (continuare)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
GENERATOR	$\underset{\sim}{\Phi}_\sigma = \Phi_\sigma/\Phi_{0N}$	u.r.	0,057	0,09	0,11	—	0,12	0,166	0,194
	$\underset{\sim}{\Sigma U}_{mi} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,503	0,8	1	—	1,106	1,866	2,46
	$\underset{\sim}{U}_{m\delta d\,j1} = U_{m\delta d\,j1}/U_{m0N}$	u.r.	0,456	0,716	0,864	—	0,941	1,31	1,527
	$\underset{\sim}{U}_{mR} = U_{mR}/U_{m0N}$	u.r.	0,046	0,083	0,135	—	0,164	0,555	0,936
	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,576	0,89	—	1	1,105	1,29	1,36
	$\underset{\sim}{\Phi}_m = \Phi_m/\Phi_{0N}$	u.r.	0,635	0,986	—	1,101	1,23	1,463	1,566
	$\underset{\sim}{\Phi}_\sigma = \Phi_\sigma/\Phi_{0N}$	u.r.	0,06	0,095	—	0,101	0,125	0,174	0,203
	$\underset{\sim}{\Sigma U}_{mi} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,55	0,874	—	1	1,21	2,04	2,7
	$\underset{\sim}{U}_{m\delta j1} = U_{m\delta j1}/U_{m0N}$	u.r.	0,498	0,783	—	0,883	1,028	1,432	1,67
MOTOR	$\underset{\sim}{U}_{mR} = U_{mR}/U_{m0N}$	u.r.	0,051	0,091	—	0,116	0,18	0,6	1,023

b) Caracteristicile magnetice parțiale :

$\underset{\sim}{\Phi} = f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d\,j1})$ — a statorului ;

$\underset{\sim}{\Phi}_m = f(\underset{\sim}{U}_{mR})$ — a rotorului ;

$\underset{\sim}{\Phi}_\sigma = f(\underset{\sim}{U}_{m\delta d\,j1})$ — a fluxului de scăpări dintre poli.

Caracteristicile magnetice sînt reprezentate în figura 2.3 a pentru generator și 2.3 b pentru motor.

B. **Solenația de excitație la sarcină nominală**

Se determină cu metoda caracteristicilor magnetice parțiale conform indicațiilor de la paragraful 1.9.2B1. și cu ajutorul caracteristicilor magnetice din figura 2.3 a și b.

Astfel, raportul de saturație, conform relației (1.138) este :

$$\frac{\underset{\sim}{U}'_{m\delta d\,j1}}{\underset{\sim}{U}'_{m\delta}} = \frac{\overline{PP''}}{\overline{PP'}} = \frac{1}{0{,}94} = 1{,}06 \quad \Big| \quad \frac{\underset{\sim}{U}'_{m\delta d\,j1}}{\underset{\sim}{U}'_{m\delta}} = \frac{0{,}9}{0{,}85} = 1{,}06 \qquad (2.74)$$

pentru care din figura 1.37 b (valorile cu ($\sim$), deoarece $\delta_M/\delta = 2$) rezultă :

$$\tilde{k}_{sd} = 0{,}978 ;$$
$$\tilde{k}_{sq} = 0{,}9 ; \qquad (2.74\ a)$$
$$\tilde{k}_1 = 0{,}00105.$$

Solenația de reacție a indusului, în u.r., conform relației (1.139 a) este :

$$\underset{\sim}{F}_a = \frac{F_a}{U_{m0N}} = \frac{8\,871}{6\,505} = 1{,}36 \text{ u.r.} \quad \Big| \quad \underset{\sim}{F}_a = \frac{9\,120}{7\,110} = 1{,}28 \text{ u.r.}$$

unde din tabelul 2.2, pentru U_{1NG} și U_{1NM} rezultă :

$U_{m0N} = 6\,505$ A. | $U_{m0N} = 7\,110$ A.

Solenația transversală, cu influența saturației magnetice, conform relației (1.139) este

$$\tilde{k}_{sq} k_{aq} \underset{\sim}{F}_a = 0{,}9 \cdot 0{,}4 \cdot 1{,}36 = 0{,}49 \text{ u.r.} \quad \Big| \quad \tilde{k}_{sq} k_{aq} \underset{\sim}{F}_a = 0{,}9 \cdot 0{,}4 \cdot 1{,}28 = 0{,}46 \text{ u.r.} \qquad (2.75)$$

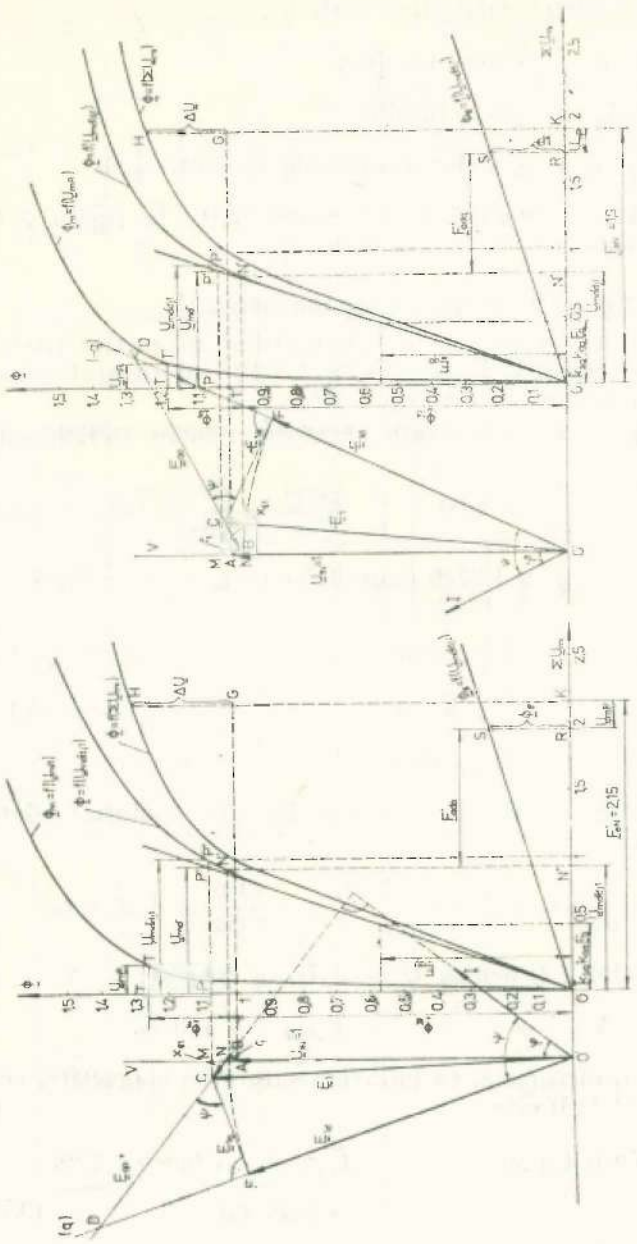


Fig. 2.3 — Caracteristicile magnetice ale generatorului sincron de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min (a) și ale motorului sincron de 400 kW ; 6 kV ; 1 000 rot/min (b) cu poli aparenți și determinarea solenației de excitație la sarcină nominală.

pentru care din figura 2.3 a (pentru generator) și figura 2.3 b (pentru motor) rezultă

$\underset{\sim}{E}_{q0} = 0{,}57$ u.r. | $\underset{\sim}{E}_{q0} = 0{,}55$ u.r. (2.75 a)

După determinarea direcției axei transversale (q) rezultă

$\psi = 56°$. | $\psi = 50°$.

Solenația „eficientă" de reacție a indusului care ține cont de efectul demagnetizant al componentelor longitudinală și transversală, conform relației (1.137)

$$\underset{\sim}{F}'_{ad\,q} = \tilde{k}_{sd} k_{ad} \underset{\sim}{F}_a \sin\psi + \tilde{k}_i \frac{\tau}{\delta} \underset{\sim}{F}_a \cos\psi =$$

$$= 0{,}978 \cdot 0{,}875 \cdot 1{,}36 \cdot \sin 56° + 0{,}00105 \cdot \frac{28{,}2}{0{,}4} \cdot 1{,}36 \cdot \cos 56° =$$

$$= 1{,}03 \text{ u.r.}$$

$$\underset{\sim}{F}'_{ad\,q} = 0{,}978 \cdot 0{,}875 \cdot 1{,}28 \cdot \sin 50° + 0{,}00105 \cdot \frac{28{,}2}{0{,}4} \cdot 1{,}28 \cdot \cos 50° = 0{,}9 \text{ u.r.}$$

(2.76)

Din construcția grafică rezultă solenația de excitație la sarcină nominală, în u.r.

$\overline{OK} = \underset{\sim}{F}'_{eN} = 2{,}15$ u.r. | $\overline{OK} = \underset{\sim}{F}'_{eN} = 1{,}9$ u.r. (2.77)

După majorarea cu $4 \div 6\%$, rezultă conform relației (1.145 a)

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06)\underset{\sim}{F}'_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06) \cdot 2{,}15 = (2{,}23 \div 2{,}28) \text{ u.r.}$$

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06) \cdot 1{,}9 = (1{,}97 \div 2{,}014) \text{ u.r.}$$

(2.77 a)

Solenația de excitație la sarcină nominală, în A, conform relației (1.145 b) este

$$F_{eN} = \underset{\sim}{F}_{eN} U_{moN} = (2.23 \div 2{,}28) \cdot 6\,505 = 14\,506 \div 14\,831 \text{ A.}$$

$$F_{eN} = (1{,}97 \div 2{,}014) \cdot 7\,110 = 14\,006 \div 14\,320 \text{ A.}$$

(2.77 b)

Se ia pentru ambele regimuri

$$F_{eN} = 14\,500 \text{ A.} \quad (2.77 \text{ c})$$

Căderea de tensiune, în procente, conform relației (1.146)

$$\Delta U = \frac{\overline{KH} - \overline{KG}}{\overline{KG}} \cdot 100 = \frac{1{,}3 - 1}{1} \cdot 100 = 30\% \qquad \Delta U = \frac{1{,}24 - 1}{1} \cdot 100 = 24\% \tag{2.78}$$

care se încadrează în limitele impuse de STAS 1893-78.

2.9. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

— Secțiunea conductorului înfășurării de excitație, considerînd că toate bobinele sînt în serie, conform relației (1.153) este:

$$s_{ce} = 1{,}1\rho_9 \frac{pF_{eN}l_{emed}}{U_e} = 1{,}1 \cdot 0{,}0265 \cdot \frac{3 \cdot 14\,500 \cdot 1{,}43}{50} = 36{,}26 \text{ mm}^2 \tag{2.79}$$

unde:

$U_e = 50$ V, stabilită conform relației (1.151).

Pentru determinarea lungimii medii a spirei, considerînd forma bobinei ca în figura 1.43 c, se stabilesc:

$$\Delta_p = 20 \text{ mm};$$

$$l'_m = l_m + 2\Delta_p = 59 + 2 \cdot 2 = 63 \text{ cm};$$

$$b \approx (1 \div 1{,}1)\frac{b_p - b_m}{2} = (1 \div 1{,}1) \cdot \frac{19{,}7 - 9}{2} = 5{,}35 \div 5{,}87 \text{ cm}.$$

În cadrul acestor limite ale lățimii conductorului (bobinei), considerînd bobina din conductor (bară) îndoit pe muchie, se va stabili conform STAS 2873-78 (anexa 5, tabelul 5-II), lățimea conductorului între $36 \div 45$ mm. Se adoptă preliminar

$$b = 36 \text{ mm};$$

lungimea medie a spirei înfășurării de excitație conform desenului din figura 1.43 c și relației (1.154 b)

$$l_{e\,med} = 2(l_m - 2b') + \pi(b_m + 2\delta_{iz} + 0{,}1b) =$$

$$= 2 \cdot (59 - 2 \cdot 1{,}5) + \pi(9 + 2 \cdot 0{,}25) + 0{,}1 \cdot 3{,}6) = 143 \text{ cm} =$$

$$= 1{,}43 \text{ m} \tag{2.80}$$

în care, constructiv (din desenul la scară) se adoptă:

$$b' = 15 \text{ mm} = 1{,}5 \text{ cm};$$

$$\delta_{iz} = 0{,}25 \text{ cm}.$$

Din STAS 2873-78 se ia conductorul din *CuEm* (cupru moale)

$$a \times b = 1{,}06 \times 36 = 37{,}9 \text{ mm}^2.$$

Din figura 1.43 c rezultă că raza de îndoire pe muchie a conductorului va fi

$$R = \frac{b_m}{2} + \delta_{iz} = \frac{9}{2} + 0{,}25 = 4{,}75 \text{ cm}. \tag{2.81}$$

Verificarea razei conform relației (1.154 c) pentru posibilitatea îndoirii pe muchie (adică $R \geqslant R_c$):

$$R_c = 0{,}05\frac{b^2}{a} = 0{,}05 \cdot \frac{36^2}{1{,}06} = 61{,}2 \text{ mm} = 6{,}12 \text{ cm} > R = 4{,}75 \text{ cm}.$$

Deoarece $R < R_c$, rezultă că acest conductor nu se poate îndoi pe muchie.

De aceea, tot din STAS 2873-78 (anexa 5, tabelul 5-II), se alege conductorul

$$CuEm \; 1{,}12 \times 32 = 35{,}5 \text{ mm}^2$$

pentru care

$$R_c = 0{,}05 \cdot \frac{32^2}{1{,}12} = 4{,}57 \text{ cm} < R = 4{,}75 \text{ cm}. \tag{2.81 a}$$

Deoarece, în acest caz, este îndeplinită condiția impusă de relația (1.154 c), se va lucra în continuare cu acest conductor.

Lungimea medie a spirei (recalculată), valoare definitivă (vezi relația (2.80))

$$l_{e\,med} = 2 \cdot (59 - 2 \cdot 1{,}5) + \pi(9 + 2 \cdot 0{,}25 + 0{,}1 \cdot 3{,}2) =$$

$$= 142{,}8 \approx 1{,}43 \text{ m}. \tag{2.82}$$

— Curentul de excitație, conform relației (1.155)

$$I_e = s_{ce}J_e = 35{,}5 \cdot 3{,}25 = 115 \text{ A} \tag{2.83}$$

în care, conform paragrafului 1.3.1B, se adoptă

$$J_e = 3{,}25 \text{ A/mm}^2.$$

— Numărul de spire pe pol conform relației (1.155 a)

$$w_e = \frac{F_{eN}}{2I_e} = \frac{14\,500}{2 \cdot 115} = 63{,}04. \qquad (2.84)$$

Se ia
$w_e = 63$ spire/pol, pentru care cu relația (1.155 c) rezultă

$$I_{eN} = \frac{F_{eN}}{2w_e} = \frac{14\,500}{2 \cdot 63} = 115 \text{ A}. \qquad (2.84\ a)$$

Curentul de excitație la funcționarea în gol, conform relației (1.155 e):

$$I_{e0} = \frac{U_{m0N}}{2w_e} = \frac{6\,505}{2 \cdot 63} = 51{,}6 \text{ A}. \quad | \quad I_{e0} = \frac{7\,110}{2 \cdot 63} = 56{,}4 \text{ A}. \qquad (2.84\ b)$$

— Construind la scară bobina de excitație (vezi secțiunea transversală din ansamblul general — fig. 2.4), reiese grosimea considerată a bobinei b_b și deci aceeași lungime medie a spirei.

— Rezistența ohmică a înfășurării de excitație conform relației (1.157 a):

$$R_{e\vartheta} = \rho_\vartheta \frac{2pw_e l_{emed}}{s_{re}} = 0{,}0265 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 63 \cdot 1{,}43}{35{,}5} = 0{,}4\ \Omega. \qquad (2.85)$$

— Verificarea tensiunii de excitație, cu relația (1.157)

$$U_e = R_{e\vartheta} I_{eN} = 0{,}4 \cdot 115 = 46 \text{ V}. \qquad (2.86)$$

— Tensiunea nominală de excitație, conform relației (1.157 b)

$$U_{eN} = U_e + \Delta U_{pe} = 46 + 3 = 49 \text{ V}. \qquad (2.86\ a)$$

Tensiunea de excitație la funcționarea în gol, conform relației (1.157 c), ținînd cont și de relația (1.157 d), este:

$$U_{e0N} = U_{e0} + \Delta U_{pe} = R_{e\vartheta a} I_{e0} + \Delta U_{pe} = 0{,}75 \cdot 0{,}4 \cdot 51{,}6 + 3 \approx 18{,}5 \text{ V}. \quad | \quad U_{e0N} = 0{,}75 \cdot 0{,}4 \cdot 56{,}4 + 3 = 20 \text{ V}. \qquad (2.86\ b)$$

— Puterea de excitație nominală conform relației (1.158)

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} = 49 \cdot 115 = 5635 \text{ W} = 5{,}635 \text{ kW}. \qquad (2.87)$$

Înălțimea exactă (definitivă) a polului

Distanța de izolație Δ, dintre bobinele de excitație (vezi fig. 1.16 d), s-a realizat prin frezarea bobinelor la bază cca 8 mm și

ajustarea bavurilor rezultate (vezi fig. 2.4, secțiunea transversală).

Izolația între spirele bobinei de excitație este din folie de micafoliu P 717 cu grosimea de 0,2 mm. Primele și ultimele două spire se izolează suplimentar cu micabandă pe sticlă 0,15 × 20 mm, un strat 1/2 suprapus + un strat cap la cap bandă de contracție 0,2 × 20 mm. Consolidarea bobinei pe pol se face cu liatex gros de 1 mm (jos și sus) peste ramele izolante care sînt din sticlotextolit gros de 2 mm (jos și sus).

Calculînd înălțimea bobinei și efectuînd, la scară, construcția polului bobinat rezultă:

$$h_m = 94{,}5 \text{ mm} \approx 9{,}5 \text{ cm},$$

valoare apropiată de cea estimată inițial: $h_m = 10$ cm (vezi relația (2.42)).

2.10. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRILOR ROTORULUI ÎN REGIM STAȚIONAR

2.10.1. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

A. **Rezistența înfășurării de excitație,** conform relației (1.161):

$$r_e = \rho_\vartheta \frac{k_{at}^2}{\pi^2} \frac{F_a}{f_1 \Phi_{1N}} \frac{l_{e\,med}}{w_e s_{re}} \cdot (k_{de} + 1) = 0{,}0246 \cdot \frac{0{,}875^2}{\pi^2} \cdot \frac{8\,871}{50 \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1{,}43}{63 \cdot 35{,}5} = 0{,}0032 \text{ u.r.}$$

unde $k_{de} = 0$.

$$r_e = 0{,}0246 \cdot \frac{0{,}875^2}{\pi^2} \cdot \frac{9\,120}{50 \cdot 7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{1{,}43}{63 \cdot 35{,}5} (10 + 1) = 0{,}035 \text{ u.r.} \qquad (2.88)$$

unde $k_{de} = 10$.

B. **Reactanţele înfăşurării de excitaţie**

— Reactanţa totală a înfăşurării de excitaţie, conform relaţiei (1.163)

$$x_e = \frac{\mu_0 F_a l_i}{\Phi_{1N}} \frac{8}{\pi} k_{ad}^2 \lambda_{es} + \frac{\sqrt{2}\, k_{ad}}{k_B} x_{ad} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8\,871 \cdot 0{,}525}{6{,}7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{8}{\pi} \cdot 0{,}875^2 \cdot 0{,}861 + \frac{\sqrt{2} \cdot 0{,}875}{1{,}14} \cdot 1{,}31 = 1{,}568 \text{ u.r.}$$

$$x_e = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9\,120 \cdot 0{,}525}{7 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{8}{\pi} \cdot 0{,}875^2 \cdot 0{,}861 + \frac{\sqrt{2} \cdot 0{,}875}{1{,}14} \cdot 1{,}28 = 1{,}533 \text{ u.r.} \qquad (2.89)$$

în care :

$$\lambda_{es} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} = 0{,}307 + 0{,}554 = 0{,}861 \qquad (2.89\ a)$$

unde conform relaţiilor (1.163 a şi b) :

$$\lambda_{ml} = 0{,}29 h_m / c_m + 0{,}112 b_m / l_m = \frac{0.29 \cdot 9{,}5}{10} + \frac{0.112 \cdot 9}{59} = 0{,}307 ;$$

$$\lambda_{pl} = 1{,}12 \left(\frac{h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D}}{c_p} - 0{,}25 \right) + 0{,}44 \left(\frac{b_p - b_m}{2c_p} + 0.2 \right) - 0{,}32 \left(\frac{b_p - b_m}{2c_p} - 0{,}5 \right)^2 =$$

$$= 1{,}12 \cdot \left(\frac{4 + 0{,}4 - \frac{19{,}7^2}{4 \cdot 54}}{6{,}83} - 0{,}25 \right) + 0{,}44 \cdot \left(\frac{19{,}7 - 9}{2 \cdot 6{,}83} + 0{,}2 \right) - 0.32 \cdot \left(\frac{19{,}7 - 9}{2 \cdot 6{,}83} - 0{,}5 \right)^2 = 0{,}554. \qquad (2.89\ b)$$

— *Reactanţa de scăpări* a înfăşurării de excitaţie

$$x_{\sigma e} = x_e - x_{ad} = 1{,}568 - 1{,}31 = 0{,}258 \text{ u.r.} \qquad x_{\sigma e} = 1{,}533 - 1{,}28 = 0{,}253 \text{ u.r.} \qquad (2.90)$$

A. **Rezistenţele înfăşurării de amortizare**

a) Rezistenţa după axa longitudinală, pentru inelul de scurt-circuitare complet, conform relaţiei (1.168)

$$r_d = \rho_{Cu\vartheta} \frac{F_a}{2 f_1 \Phi_{1N}} \left(\frac{k_r k_b l_b}{s_a} + \frac{k_i \tau C_d}{s_i} \right) \frac{1}{4 C_D} = 0{,}0246 \cdot \frac{8\,871}{2 \cdot 50 \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 1 \cdot 0{,}63}{50{,}24} + \frac{1 \cdot 0{,}282 \cdot 1{,}3}{239} \right) \cdot \frac{1}{4 \cdot 1{,}3} = 0{,}088 \text{ u.r.}$$

$$r_d = 0{,}0246 \cdot \frac{9\,120}{2 \cdot 50 \cdot 7 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{1 \cdot 4 \cdot 0{,}63}{50{,}24} + \frac{1 \cdot 0{,}282 \cdot 1{,}3}{239} \right) \cdot \frac{1}{4 \cdot 1{,}3} = 0{,}31 \text{ u.r.} \qquad (2.91)$$

unde, pentru o înfăşurare conform figurii 1.16 d, din figura 1.45 a şi 1.46 a pentru $n_a = 10$ şi unghiul 2β dat de relaţia (1.168 b)

$$2\beta = \frac{(n_a - 1) t_a}{\tau} \cdot 180^\circ = 100{,}53^\circ$$

rezultă :

$$\frac{1{,}3}{59} = C_d = 1{,}3 ;$$

$$C_D = 1{,}3$$

iar ceilalţi termeni au valorile :

$k_r = 1$, pentru bare cu $d_a = 8$ mm ;

$k_i = 1$;

$k_b = 1$, pentru bare de cupru ; | $k_b = 4$, pentru bare de alamă ;

$l_b = l_m +$ lăţimea inelului $= 59 + 4 = 0{,}63$ m.

b) Rezistența după axa transversală, pentru inelul de scurtcircuitare complet, conform relației (1.169)

$$r_q = \rho c_{u\vartheta}\frac{F_a}{2f_1\Phi_{1N}}\left(\frac{k_r k_\delta l_\delta}{s_a} + \frac{k_t \tau C_q}{s_t}\right)\frac{1}{4C_Q} =$$

$$= 0{,}0246\cdot\frac{8\,871}{2\cdot 50\cdot 6{,}7\cdot 10^{-2}}\cdot\left(\frac{1\cdot 1\cdot 0{,}63}{50{,}24} + \frac{1\cdot 0{,}282\cdot 3}{239}\right)\cdot\frac{1}{4\cdot 3{,}6} = 0{,}036 \text{ u.r.}$$

$$r_q = 0{,}0246\cdot\frac{9\,120}{2\cdot 50\cdot 7\cdot 10^{-2}}\cdot\left(\frac{1\cdot 4\cdot 0{,}62}{50{,}24} + \frac{1\cdot 0{,}282\cdot 3}{239}\right)\cdot\frac{1}{4\cdot 3{,}6} = 0{,}119 \text{ u.r.} \qquad (2.92)$$

unde, pentru $n_a = 10$ și $2\beta = 100{,}53°$, din figura 1.45 b și 1.46 b rezultă :

$$C_q = 3\,;$$

$$C_Q = 3{,}6.$$

B. **Reactanțele de scăpări ale înfășurării de amortizare**

a) Reactanța de scăpări după axa longitudinală, pentru inelul de scurtcircuitare complet, conform relației (1.171)

$$x_{\sigma d} = \frac{\pi\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}}[l_{Fe2}(\lambda_{ca} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_d]\frac{1}{4C_D} + \sigma_{ad}x_{ad} =$$

$$= \frac{\pi\cdot 1\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 8\,871}{6{,}7\cdot 10^{-2}}\cdot[0{,}59\cdot(1{,}628 + 0{,}7) + 0{,}3\cdot 0{,}282\cdot 1{,}3]\cdot\frac{1}{4\cdot 1{,}3} + 0{,}14\cdot 1{,}31 = 0{,}33 \text{ u.r.}$$

$$x_{\sigma d} = \frac{\pi\cdot 1\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 9\,120}{7\cdot 10^{-2}}\cdot[0{,}59\cdot(1{,}628 + 0{,}7) + 0{,}3\cdot 0{,}282\cdot 1{,}3]\cdot\frac{1}{4\cdot 1{,}3} + 0{,}14\cdot 1{,}28 = 0{,}32 \text{ u.r.} \qquad (2{,}93)$$

unde, conform relațiilor (1.171 a), (1.171 c), (1.171 d) și (1.171 e), rezultă :

$$\lambda_{ca} = \left(0{,}875 - \frac{b_\delta}{2d_a}\right) + \frac{h_\delta}{b_\delta} = \left(0{,}875 - \frac{2{,}5}{2\cdot 8}\right) + \frac{2{,}5}{2{,}5} = 1{,}628\,; \qquad (2.93\text{ a})$$

$$\lambda_{da} = \frac{5\frac{\delta}{b_\delta}}{5 + 4\frac{\delta}{b_\delta}} = \frac{5\cdot\frac{0{,}4}{0{,}25}}{5 + 4\cdot\frac{0{,}4}{0{,}25}} = 0{,}7\,;$$

$$\lambda_{fa} = 0{,}3\,;$$

$$\sigma_{ad} = (1 + \sigma_{ad\,curbe})k_d - 1 = (1 + 0{,}2)\cdot 0{,}95 - 1 = 0{,}14$$

în care din figura 1.47 a pentru $n_a = 10$ și $2\beta = 100{,}53°$ rezultă

$$\sigma_{ad\,curbe} = 0{,}2$$

iar

$$k_d = \frac{\alpha_p\pi + \sin(\alpha_p\pi)}{\pi} = \frac{0{,}7\cdot\pi + \sin(0{,}7\cdot 180°)}{\pi} = 0{,}95.$$

b) Reactanța de scăpări după axa transversală pentru cazul inelelor de scurtcircuitare complete, conform relației (1.172)

$$x_{\sigma q} = \frac{\pi\mu_0 F_a}{\Phi_{1N}}[l_{Fe2}(\lambda_{ca} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_q]\frac{1}{4C_Q} + \sigma_{aq}x_{aq} =$$

$$= \frac{\pi\cdot 1\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 8\,871}{6{,}7\cdot 10^{-2}}\cdot[0{,}59\cdot(1{,}628 + 0{,}7) + 0{,}3\cdot 0{,}282\cdot 3]\cdot\frac{1}{4\cdot 3{,}6} + 0{,}01\cdot 0{,}705 = 0{,}066 \text{ u.r.}$$

$$x_{\sigma q} = \frac{\pi\cdot 1\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 9\,120}{7\cdot 10^{-2}}\cdot[0{,}59\cdot(1{,}628 + 0{,}7) + 0{,}3\cdot 0{,}282\cdot 3]\cdot\frac{1}{4\cdot 3{,}6} + 0{,}01\cdot 0{,}69 = 0{,}065 \text{ u.r.} \qquad (2.94)$$

unde din figura 1.47 b rezultă

$$\sigma_{aq} = 0{,}01.$$

2.11. PARAMETRII ȘI CONSTANTELE DE TIMP ALE REGIMULUI TRANZITORIU

2.11.1. PARAMETRII ÎN REGIM TRANZITORIU

a) *Reactanța tranzitorie longitudinală*, conform relației (1.174)

$$x'_d = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}}} = \quad \Big| \quad x'_d = 0{,}087 + \frac{1}{\frac{1}{1{,}28} + \frac{1}{0{,}253}} =$$

$$= 0{,}088 + \frac{1}{\frac{1}{1{,}31} + \frac{1}{0{,}258}} = \quad \Big| \quad = 0{,}298 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}303 \text{ u.r.} \qquad (2.95)$$

b) *Reactanța tranzitorie transversală*, conform relației (1.174 a)

$$x'_q \approx x_q = 0{,}8 \text{ u.r.} \quad \Big| \quad x'_q = 0{,}78 \text{ u.r.} \qquad (2.95 \text{ a})$$

c) *Reactanța supratranzitorie longitudinală*, conform relației (1.175)

$$x''_d = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma e}} + \frac{1}{x_{\sigma d}}} = \quad \Big| \quad x''_d = 0{,}087 +$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{1{,}28} + \frac{1}{0{,}253} + \frac{1}{0{,}32}} =$$

$$= 0{,}088 + \frac{1}{\frac{1}{1{,}31} + \frac{1}{0{,}258} + \frac{1}{0{,}33}} = \quad \Big| \quad = 0{,}214 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}218 \text{ u.r.} \qquad (2.96)$$

d) *Reactanța supratranzitorie transversală*, conform relației (1.175 a)

$$x''_q = x_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma q}}} = \quad \Big| \quad x''_q = 0{,}087 + \frac{1}{\frac{1}{0{,}69} + \frac{1}{0{,}065}} =$$

$$= 0{,}088 + \frac{1}{\frac{1}{0{,}705} + \frac{1}{0{,}066}} = \quad \Big| \quad = 0{,}146 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}148 \text{ u.r.} \qquad (2.96 \text{ a})$$

e) *Reactanța inversă* conform relației (1.177), cînd reactanța exterioară este mare

$$x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2} = \frac{0{,}218 + 0{,}148}{2} = \quad \Big| \quad x_2 = \frac{0{,}214 + 0{,}146}{2} = 0{,}18 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}183 \text{ u.r.} \qquad (2.97)$$

Dacă reactanța exterioară ar fi mică (scurtcircuitul s-ar produce la bornele mașinii), atunci conform relației (1.177 a)

$$x_2 = \sqrt{x''_d x''_q} = \sqrt{0{,}218 \cdot 0{,}148} = \quad \Big| \quad x_2 = \sqrt{0{,}214 \cdot 0{,}146} = 0{,}176 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}179 \text{ u.r.} \qquad (2.97 \text{ a})$$

Se va considera x_2 dat de relația (2.97).

2.11.2. CONSTANTELE DE TIMP ALE REGIMULUI TRANZITORIU

a) *Constanta de timp a înfășurării de excitație*, conform relației (1.178)

$$T_e = \frac{x_e}{r_e} = \frac{1{,}568}{0{,}0032} = 490 \text{ rad.} \quad \Big| \quad T_e = \frac{1{,}533}{0{,}035} = 43{,}8 \text{ rad.}$$

sau

$$T_e = \frac{x_e}{2\pi f_1 r_e} = \frac{1{,}568}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}0032} = \quad \Big| \quad T_e = \frac{1{,}533}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}035} = 0{,}139 \text{ s.}$$

$$= 1{,}55 \text{ s.} \qquad (2.98)$$

b) *Constanta de timp a curenților tranzitorii din stator și rotor*, conform relației (1.179)

$$T'_d = T_e \frac{x'_d}{x_d} = 1{,}55 \cdot \frac{0{,}303}{1{,}4} = \quad \Big| \quad T'_d = 0{,}139 \cdot \frac{0{,}298}{1{,}37} = 0{,}0302 \text{ s.}$$

$$= 0{,}335 \text{ s} \qquad (2.99)$$

c) *Constanta de timp a înfășurării de amortizare după axa longitudinală*, conform relației (1.180)

$$T''_{dd} = \frac{x'_{\sigma d}}{\omega r_d} = \frac{0{,}545}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}088} = \quad \Big| \quad T''_{dd} = \frac{0{,}531}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}31} = 0{,}00545 \text{ s}$$

$$= 0{,}0197 \text{ s} \qquad (2.100)$$

unde, conform relației (1.180 a)

$$x'_{cd} = x_{cd} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{ce}}} = \qquad x'_{cd} = 0{,}32 + \frac{1}{\frac{1}{1{,}28} + \frac{1}{0{,}253}} =$$

$$= 0{,}33 + \frac{1}{\frac{1}{1{,}31} + \frac{1}{0{,}258}} = \qquad = 0{,}531 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}545 \text{ u.r.} \qquad (2.100 \text{ a})$$

d) *Constanta de timp a curenților supratranzitorii*, conform relației (1.181)

$$T''_d = T'_{d0}\frac{x''_d}{x'_d} = 0{,}0197 \cdot \frac{0{,}218}{0{,}303} = \qquad T''_d = 0{,}00545 \cdot \frac{0{,}214}{0{,}298} = 0{,}0039 \text{ s.}$$

$$= 0{,}0141 \text{ s.} \qquad (2.101)$$

e) *Constanta de timp a înfășurării statorului*, conform relației (1.182)

$$T_a = \frac{x_2}{\omega x_1} = \frac{0{,}183}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}0256} = \qquad T_a = \frac{0{,}18}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}0246} = 0{,}0232 \text{ s.}$$

$$= 0.0227 \text{ s.} \qquad (2.102)$$

2.12. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT

2.12.1. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT TRIFAZAT SIMETRIC

— Curentul permanent (staționar) de scurtcircuit, conform relației (1.183)

$$\underset{\sim}{I}_d = \frac{1}{x_d} = \frac{1}{1{,}4} = 0{,}714 \text{ u.r.} \qquad \underset{\sim}{I}_d = \frac{1}{1{,}37} = 0{,}73 \text{ u.r.}$$

sau (2.103)

$$I_d = \underset{\sim}{I}_d I_N = 0{,}714 \cdot 40{,}32 = \qquad I_d = 0{,}73 \cdot 45{,}6 = 33{,}3 \text{ A.}$$

$$= 28{,}8 \text{ A.}$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit, conform relației (1.183 a)

$$\underset{\sim}{I}'_d = \frac{1}{x'_d} = \frac{1}{0{,}303} = 3{,}3 \text{ u.r.} \qquad \underset{\sim}{I}'_d = \frac{1}{0{,}298} = 3{,}35 \text{ u.r.}$$

sau (2.103 a)

$$I'_d = \underset{\sim}{I}'_d I_N = 3{,}3 \cdot 40{,}32 = \qquad I'_d = 3{,}35 \cdot 45{,}6 = 152{,}7 \text{ A.}$$

$$= 133 \text{ A.}$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit, conform relației (1.183 b)

$$\underset{\sim}{I}''_d = \frac{1}{x''_d} = \frac{1}{0{,}218} = 4{,}58 \text{ u.r.} \qquad \underset{\sim}{I}''_d = \frac{1}{0{,}214} = 4{,}67 \text{ u.r.}$$

sau (2.103 b)

$$I''_d = \underset{\sim}{I}''_d I_N = 4{,}58 \cdot 40{,}32 = \qquad I''_d = 4{,}67 \cdot 45{,}6 = 212{,}9 \text{ A.}$$

$$= 184{,}6 \text{ A.}$$

2.12.2. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT BIFAZAT

— Curentul permanent de scurtcircuit bifazat, conform relației (1.185)

$$\underset{\sim}{I}_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{x_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{1{,}4 + 0{,}183} = \qquad \underset{\sim}{I}_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{1{,}37 + 0{,}18} = 1{,}11 \text{ u.r.}$$

$$= 1{,}09 \text{ u.r.}$$

sau (2.104)

$$I_{d\,II} = \underset{\sim}{I}_{d\,II} I_N = 1{,}09 \cdot 40{,}32 = \qquad I_{d\,II} = 1{,}11 \cdot 45{,}6 = 50{,}6 \text{ A.}$$

$$= 43{,}9 \text{ A.}$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit bifazat, conform relației (1.185 a)

$$\underset{\sim}{I}'_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{x'_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{0{,}303 + 0{,}183} = \qquad \underset{\sim}{I}'_{d\,II} = \frac{\sqrt{3}}{0{,}298 + 0{,}18} = 3{,}62 \text{ u.r.}$$

$$= 3{,}56 \text{ u.r.}$$

sau (2.104 a)

$$I'_{d\,II} = \underset{\sim}{I}'_{d\,II} I_N = 3{,}56 \cdot 40{,}32 = \qquad I'_{d\,II} = 3{,}62 \cdot 45{,}6 = 165 \text{ A.}$$

$$= 143{,}5 \text{ A.}$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit bifazat, conform relației (1.185 b)

$$\underline{I}''_{dII} = \frac{\sqrt{3}}{x''_d + x_2} = \frac{\sqrt{3}}{0{,}218 + 0{,}183} =$$

$$= 4{,}31 \text{ u.r.}$$

sau

$$I''_{dII} = \underline{I}''_{dII} I_N = 4{,}31 \cdot 40{,}32 =$$

$$= 173{,}7 \text{ A.}$$

$$\underline{I}''_{dII} = \frac{1{,}73}{0{,}214 + 0{,}18} = 4{,}39 \text{ u.r.}$$

(2.104 b)

$$I''_{dII} = 4{,}39 \cdot 45{,}6 = 200 \text{ A.}$$

2.12.3. CURENȚII DE SCURTCIRCUIT MONOFAZAT

— Curentul permanent de scurtcircuit monofazat, conform relației (1.186)

$$\underline{I}_{d1} = \frac{3}{x_d + x_2 + x_0} =$$

$$= \frac{3}{1{,}4 + 0{,}183 + 0{,}0853} =$$

$$= 1{,}79 \text{ u.r.}$$

sau

$$I_{d1} = \underline{I}_{d1} I_N = 1{,}79 \cdot 40{,}32 =$$

$$= 72{,}1 \text{ A.}$$

$$\underline{I}_{d1} = \frac{3}{1{,}37 + 0{,}18 + 0{,}0817} =$$

$$= 1{,}83 \text{ u.r.}$$

(2.105)

$$I_{d1} = 1{,}83 \cdot 45{,}6 = 83{,}4 \text{ A.}$$

— Curentul tranzitoriu de scurtcircuit monofazat, conform relației (1.186 a)

$$\underline{I}'_{d1} = \frac{3}{x'_d + x_2 + x_0} =$$

$$= \frac{3}{0{,}303 + 0{,}183 + 0{,}0853} =$$

$$= 5{,}25 \text{ u.r.}$$

sau

$$I'_{d1} = \underline{I}'_{d1} I_N = 5{,}25 \cdot 40{,}32 =$$

$$= 211{,}6 \text{ A.}$$

$$\underline{I}'_{d1} = \frac{3}{0{,}298 + 0{,}18 + 0{,}0817} =$$

$$= 5{,}33 \text{ u.r.}$$

(2.105 a)

$$I'_{d1} = 5{,}33 \cdot 45{,}6 = 243 \text{ A.}$$

— Curentul supratranzitoriu de scurtcircuit monofazat, conform relației (1.186 b)

$$\underline{I}''_{d1} = \frac{3}{x''_d + x_2 + x_0} =$$

$$= \frac{3}{0{,}218 + 0{,}183 + 0{,}0853} =$$

$$= 6{,}16 \text{ u.r.}$$

sau

$$I''_{d1} = \underline{I}''_{d1} I_N = 6{,}16 \cdot 40{,}32 =$$

$$= 248{,}3 \text{ A.}$$

$$\underline{I}''_{d1} = \frac{3}{0{,}214 + 0{,}18 + 0{,}0847} =$$

$$= 6{,}26 \text{ u.r.}$$

(2.105 b)

$$I''_{d1} = 6{,}26 \cdot 45{,}6 = 285{,}4 \text{ A.}$$

2.12.4. CURENTUL MAXIM DE SCURTCIRCUIT BRUSC (ȘOC)

Amplitudinea curentului de șoc, conform relației (1.187)

$$\underline{I}_{k\,max} = \underline{I}_{șoc} = 1{,}8 \cdot \frac{1{,}05 \cdot \sqrt{2}}{x''_d} =$$

$$= 1{,}8 \cdot \frac{1{,}05 \cdot \sqrt{2}}{0{,}218} = 12{,}2 \text{ u.r.} < 21$$

sau

$$I_{k\,max} = I_{șoc} = \underline{I}_{șoc} I_N =$$

$$= 12{,}2 \cdot 40{,}32 = 492 \text{ A.}$$

$$\underline{I}_{k\,max} = I_{șoc} = 1{,}8 \cdot \frac{1{,}05 \cdot \sqrt{2}}{0{,}214} =$$

$$= 12{,}5 \text{ u.r.} < 21$$

(2.106)

$$I_{k\,max} = 12{,}5 \cdot 45{,}6 = 570 \text{ A,}$$

valori care se încadrează în limitele impuse de STAS 1893-78.

2.12.5. RAPORTUL DE SCURTCIRCUIT

— Curentul de excitație la funcționarea în gol, s-a determinat anterior (vezi relația (2.84 b))

$$I_{e0} = 51{,}6 \text{ A.} \qquad | \qquad I_{e0} = 56{,}4 \text{ A.} \qquad (2.107)$$

— Curentul de excitație la funcționarea în sarcină nominală, în unități relative, este dat de relația

$$\underline{I}_{eN} = \frac{I_{eN}}{I_{e0}} = \frac{115}{51{,}6} = 2{,}23 \text{ u.r.} \qquad | \qquad \underline{I}_{eN} = \frac{115}{56{,}4} = 2{,}04 \text{ u.r.} \qquad (2.108)$$

— Curentul de scurtcircuit pentru excitația la funcționarea în gol, conform relației (1.188), adică raportul de scurtcircuit

$$\underline{I}_{k0} = \frac{\underline{E}'_0}{x_d} = RSC = \frac{1{,}05}{1{,}4} = 0{,}753 \text{ u.r.}$$

unde din figura 2.5 a rezultă pentru $\underline{I}_{e0}$: $\underline{E}'_0 = 1{,}05$ u.r.; pentru $\underline{I}_{eN}$: $\underline{E}''_0 = 2{,}29$ u.r.

$$\underline{I}_{k0} = \frac{1{,}1}{1{,}37} = 0{,}803 \text{ u.r.} \qquad (2.109)$$

unde din figura 2.5 b rezultă $\underline{E}'_0 = 1{,}1$ u.r.; $\underline{E}''_0 = 2{,}25$ u.r.

— Curentul de scurtcircuit pentru excitația nominală, conform relației (1.188 a)

$$\underline{I}_{kN} = \frac{\underline{E}''_0}{x_d} = \underline{I}_{k0}\underline{I}_{eN} = 0{,}753 \cdot 2{,}23 = 1{,}67 \text{ u.r.}$$

$$\underline{I}_{kN} = 0{,}803 \cdot 2{,}04 = 1{,}64 \text{ u.r.} \qquad (2.110)$$

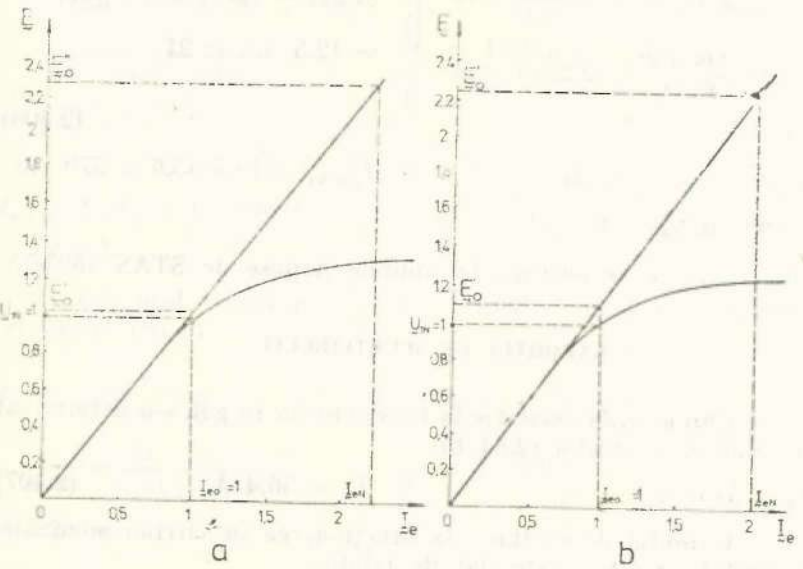


Fig. 2.5 — Caracteristicile de funcționare în gol și determinarea curentului de scurtcircuit:
a — pentru generatorul de 440 kVA; 6,3 kV; 1 000 rot/min; b — pentru motorul de 400 kW; 6 kV; 1 000 rot/min.

2.13. CARACTERISTICILE MAȘINII SINCRONE

A. **Căderea de tensiune** $\Delta U\%$, este determinată anterior (vezi relația (2.78))

$$\Delta U = 30\%. \qquad \Delta U = 24\%. \qquad (2.111)$$

B. **Curenții de scurtcircuit,** sînt determinați în paragraful 2.12.

C. **Capacitatea statică de suprasarcină,** conform relației (1.189):

$$k_M = \frac{\underline{I}_{kN}}{\cos\varphi_N} k_2 = \frac{1{,}67}{0{,}8} \cdot 1{,}05 = 2{,}18 \text{ u.r.}$$

$$k_M = \frac{1{,}64}{0{,}9} \cdot 1{,}055 = 1{,}92 \text{ u.r.} \qquad (2.112)$$

unde, conform figurii 1.49 pentru

$$\varepsilon_M = \frac{x_d - x_q}{\underline{E}''_0 x_q} = \frac{1{,}4 - 0{,}8}{2{,}29 \cdot 0{,}8} = 0{,}328$$

rezultă $k_2 = 1{,}05$.

$$\varepsilon_M = \frac{1{,}37 - 0{,}78}{2{,}25 \cdot 0{,}78} = 0{,}336$$

$k_2 = 1{,}055$.

Valorile lui $k_M = M_M/M_N$ sînt în limitele normale pentru aceste mașini.

D. **Cuplul de rotație la scurtcircuit bruse,** conform relației (1.189 b)

$$M_{k3} = \frac{1{,}05^2}{x''_d} M_N = \frac{1{,}05^2}{0{,}218} \cdot 420 = 2\,124 \text{ daNm}$$

$$M_{k3} = \frac{1{,}05^2}{0{,}211} \cdot 382 = 1\,968 \text{ daNm} \qquad (2.113)$$

unde, conform relației (1.189 c):

$$M_N = 956 \cdot \frac{P_N}{n_1} = 956 \cdot \frac{440}{1\,000} = 420 \text{ daNm.}$$

$$M_N = 956 \cdot \frac{400}{1\,000} = 382 \text{ daNm.} \qquad (2.113\text{ a})$$

E. **Pierderile și randamentul mașinii sincrone**

Se efectuează conform cap. 6 din vol. I, la relațiile căruia se vor face dealtfel și referirile din acest paragraf.

1. *Pierderile principale în fier*

a) *Pierderile principale în jugul statorului*, conform relației (6.1) din vol. I (în locul indicelui „*s*" — stator — s-a pus indicele „1")

$$P_{j1} = k_j p_{j1} G_{j1} = 1{,}3 \cdot 5{,}18 \cdot 404 = 2{,}72 \text{ kW} \qquad P_{j1} = 1{,}3 \cdot 5{,}4 \cdot 404 = 2{,}83 \text{ kW} \quad (2.114)$$

în care :

$$k_j = 1{,}3 ;$$

conform relației (6.1 b)

$$p_{j1} = p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1{,}3} B_{j1}^2 = 2{,}4 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1{,}3} \cdot 1{,}47^2 = 5{,}18 \text{ W/kg} \qquad p_{j1} = 2{,}4 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1{,}3} \cdot 1{,}5^2 = 5{,}4 \text{ W/kg} \quad (2.114\text{ a})$$

unde :

$p_{10/50} = 2{,}4$ W/kg pentru tablă silicioasă, laminată la rece cu cristale neorientate, de 0,5 mm grosime ;

— masa fierului, considerînd $\gamma_{Fe} = 7{,}8$ kg/dm³, conform relației (6.1 a)

$$G_{j1} = G_{Fej1} = \gamma_{Fe} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{ej1}^2 - D_{ij1}^2) k_{Fe} l_{Fe} \cdot 10^{-3} = 7{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (74^2 - 63{,}5^2) \cdot 0{,}95 \cdot 48 = 404 \text{ kg} \quad (2.114\text{ b})$$

cu :

$$D_{ij1} = D + 2h_{c1} = 54 + 2 \cdot 4{,}75 = 63{,}5 \text{ cm} ;$$

$$D_{ej1} = D_e = 74 \text{ cm}.$$

b) *Pierderile principale în dinții statorului*, conform relației (6.2 a) vol. I

$$P_{d1} = k_d p_{d1} G_{d1} = 1{,}8 \cdot 4{,}97 \cdot 177 = 1{,}58 \text{ kW} \qquad P_{d1} = 1{,}8 \cdot 5{,}25 \cdot 177 = 1{,}67 \text{ kW} \quad (2.115)$$

în care :

$$k_d = 1{,}8 ;$$

conform relației (6.2 b)

$$p_{d1} = p_{10/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1{,}3} B_{d1\,med}^2 = 2{,}4 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1{,}3} \cdot 1{,}44^2 = 4{,}97 \text{ W/kg} ; \qquad p_{d1} = 2{,}4 \left(\frac{50}{50}\right)^{1{,}3} \cdot 1{,}48^2 = 5{,}25 \text{ W/kg} ; \quad (2.115\text{ a})$$

conform relației (6.2 a)

$$G_{d1} = h_{c1} b_{d1\,med} l_{Fe} k_{Fe} Z_1 \gamma_{Fe} \cdot 10^{-3} = 4{,}75 \cdot 1{,}46 \cdot 48 \cdot 0{,}95 \cdot 72 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3} = 177 \text{ kg}. \quad (2.115\text{ b})$$

c) *Pierderile principale* totale în fier

$$P_{Fepr} = P_{j1} + P_{d1} = 2{,}72 + 1{,}58 = 4{,}3 \text{ kW}. \qquad P_{Fepr} = 2{,}83 + 1{,}67 = 4{,}5 \text{ kW}. \quad (2.116)$$

2. *Pierderile suplimentare în fier la funcționarea în gol*

a) *Pierderile pe suprafața pieselor polare*, conform relației (6.5) și pentru $\delta_M/\delta = 2$

$$P_{supr} = 0{,}5 \cdot 2p\tau\alpha_p l_p p_{supr} \cdot 10^{-4} = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 28{,}2 \cdot 0{,}7 \cdot 59 \cdot 1\,177 = 0{,}41 \text{ kW} \qquad P_{supr} = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 28{,}2 \cdot 0{,}7 \cdot 59 \cdot 1\,328 \cdot 10^{-4} = 0{,}46 \text{ kW} \quad (2.117)$$

în care, conform relației (6.5 a)

$$p_{supr} = k_0 \left(\frac{Z_1 n_1}{10\,000}\right)^{1{,}5} (10 B_0 l_1)^2 = 4{,}5 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1\,000}{10\,000}\right)^{1{,}5} \cdot (10 \cdot 0{,}16 \cdot 2{,}35)^2 = 1\,177 \text{ W/m}^2 \qquad p_{supr} = 4{,}5 \cdot \left(\frac{72 \cdot 1\,000}{10\,000}\right)^{1{,}5} \cdot (10 \cdot 0{,}17 \cdot 2{,}35)^2 = 1\,328 \text{ W/m}^2 \quad (2.117\text{ a})$$

unde conform tabelului 2.3, pentru tablă de oțel cu grosimea de 1 mm, din care se fac polii, rezultă

$k_0 = 4{,}5$ pentru „fără prelucrare".

TABELUL 2.3

Valoarea coeficientului k_a

Marca tolei	Grosimea tolei [mm] Δ	Modul de prelucrare		
		Fără prelucrare	Prelucrat superficial	Prelucrat
Tablă silicioasă laminată la cald	0,5	1,4	1,8	2,0
Tablă silicioasă laminată la rece	0,5	1.3	1,6	1,9
Tablă din oțel	0,5	2,0	2,5	2,8
Tablă din oțel	1,0	4,5	5,0	5,5
Tablă din oțel	2,0	7.2	8,0	8,6
—	masiv	—	—	23,3

Pentru calculul lui B_0 se va folosi β_0 luat din figura 2.6. Astfel pentru

$$\frac{a_s}{\delta} = \frac{b_{r1}}{\delta} = \frac{11}{4} = 2{,}75$$

rezultă (pentru pierderile pe suprafața rotorului se ia „a_s" și invers)

$$\beta_0 = 0{,}18.$$

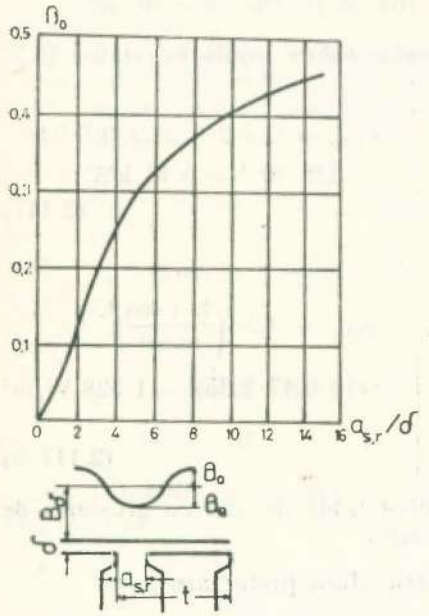


Fig. 2.6 — Coeficientul β_0 pentru determinarea variației oscilației amplitudinii inducției la suprafața miezului magnetic stator (s) sau rotor (r).

pentru care amplitudinea variației inducției magnetice la suprafața piesei polare este

$B_0 = \beta_0 k_C B_\delta =$
$= 0{,}18 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}78 = 0{,}16$ T.

$B_0 = 0{,}18 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}8 = 0{,}17$ T. (2.117 b)

OBSERVAȚIE. Deoarece deschiderea istumului crestăturilor înfășurării de amortizare este mică, iar întrefierul δ mare, se neglijează atît pierderile suplimentare pe suprafața statorului cît și pierderile suplimentare pulsatorii în cele două armături. Acest lucru se observă de altfel și din figura 2.6, din care pentru $b_0/\delta = 2{,}5/4 = 0{,}62$, rezultă $\beta_{02} = 0{,}025$, care conduce la valori ale pulsației inductanței magnetice, neglijabile.

b) *Pierderile totale în fier la funcționarea în gol*

$P_{Fe} = P_{Fepr} + P_{supr} = 4{,}3 +$
$+ 0{,}41 = 4{,}71$ kW.

$P_{Fe} = 4{,}5 + 0{,}46 = 4{,}96$ kW. (2.118)

3. *Pierderile electrice principale la funcționarea în sarcină*

a) *Pierderile electrice în indus*, conform relației (6.14)

$P_{el1} = m_1 R_1 I_N^2 =$
$= 3 \cdot 2{,}31 \cdot 40{,}32^2 = 11{,}2$ kW.

$P_{el1} = 3 \cdot 1{,}87 \cdot 45{,}6^2 =$
$= 11{,}66$ kW. (2.119)

b) *Pierderile datorită curentului de excitație*, considerînd excitație statică sau grup separat de excitație, sînt date de relația (2.87)

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} = 49 \cdot 115 = 5{,}635 \text{ kW}. \quad (2.120)$$

c) *Pierderile electrice principale totale*

$P_{el} = P_{el1} + P_{eN} = 11{,}2 +$
$+ 5{,}635 = 16{,}83$ kW.

$P_{el} = 11{,}66 + 5{,}635 =$
$= 17{,}29$ kW. (2.121)

4. *Pierderile mecanice prin frecare și de ventilație* conform relației (6.25) vol. I

$$P_{mec} = P_{fr+v} + P_{fpe} = 2{,}8 + 0{,}14 = 2{,}94 \text{ kW} \quad (2.122)$$

în care:

conform relației (6.25 a) rezultă

$$P_{fr+v} \approx 0{,}8 \cdot 2p \left(\frac{D}{40}\right)^3 \sqrt{\frac{l_r}{19}} \cdot 10^3 =$$

$$= 0{,}8 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \left(\frac{27{,}84}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{57}{19}} \cdot 10^3 = 2\,803 \text{ W} \approx 2{,}8 \text{ kW} \quad (2.122\text{ a})$$

unde :

$$v = \frac{\pi D_c n_1}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}532 \cdot 1\,000}{60} = 27{,}84 \text{ m/s};$$

conform relației (6.24)

$$P_{fpe} = 9{,}81 \mu_{pe} p_{pe} S_{pe} v_i = 9{,}81 \cdot 0{,}17 \cdot 0{,}2 \cdot 32 \cdot 13 =$$
$$= 138{,}75 \text{ W} \approx 0{,}14 \text{ kW} \qquad (2.122 \text{ b})$$

unde :

$\mu_{pe} = 0{,}17$ (pentru inele $\mu_{pe} = 0{,}16 \div 0{,}18$) ;
$p_{pe} = 0{,}2$ daN/cm² (limitele normale : $0{,}16 \div 0{,}22$ daN/cm²) ; secțiunea necesară a tuturor periilor, considerînd o densitate în perie $J_{pe} = 10$ A/cm²

$$S_{pe} = 2 \frac{I_{eN}}{J_{pe}} = 2 \cdot \frac{115}{10} = 23 \text{ cm}^2.$$

Se aleg cîte două perii de 25 × 32 mm² pe fiecare inel; ceea ce rezultă

$$S_{pe} = 4 \cdot (2{,}5 \times 3{,}2) = 32 \text{ cm}^2 ;$$

viteza periferică a inelelor colectoare, considerînd diametrul acestora $D_i = 25$ cm.

$$v_i = \frac{\pi D_i n_1}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}25 \cdot 1\,000}{60} = 13 \text{ m/s}.$$

5. *Pierderile de ventilație datorită ventilatorului propriu*, conform relației (6.26,) vol. I

$$P_v = \frac{QH}{\eta_v} = \frac{0{,}82 \cdot 308{,}26}{0{,}2} = \qquad P_v = \frac{0{,}75 \cdot 308{,}26}{0.2} = 1{,}15 \text{ kW}$$
$$= 1{,}26 \text{ kW} \qquad (2.123)$$

în care :

$\eta_v = 0{,}2$ (limitele normale pentru ventilatorul radial : $0{,}15 \div 0{,}25$) ;

debitul de aer necesar pentru ventilație, conform relației (6.26 a)

$$Q = \frac{(1 - \eta) P_N}{1{,}1 \theta_{aer}} = \qquad Q = \frac{(1 - 0{,}938) \cdot 400}{1{,}1 \cdot 30} =$$
$$= \frac{(1 - 0{,}938) \cdot 440}{1{,}1 \cdot 30} = 0{,}82 \text{ m}^3/\text{s}; \qquad = 0{,}75 \text{ m}^3/\text{s}; \qquad (2.123 \text{ a})$$

presiunea asigurată de ventilator, conform relației (6.26 b)

$$H = 1{,}1 \eta_p (u_1^2 - u_2^2) = 1{,}1 \cdot 0{,}4 \cdot (38{,}72^2 - 28{,}26^2) = 308{,}26 \text{ Pa} \qquad (2.123 \text{ b})$$

unde :

randamentul ventilatorului propriu al mașinii

$\eta_p = 0{,}4$ (limitele normale : $0{,}4 \div 0{,}45$) ;

vitezele periferice ale ventilatorului :

$$u_1 = \frac{\pi D_1 n_1}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}74 \cdot 1\,000}{60} = 38{,}72 \text{ m/s};$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n_1}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}54 \cdot 1\,000}{60} = 28{,}26 \text{ m/s}$$

cu :

$D_1 \approx D_c = 0{,}74$ m, este diametrul exterior al ventilatorului ;
$D_2 \approx D = 0{,}54$ m, este diametrul interior al ventilatorului.

6. *Pierderile suplimentare în fier* la funcționarea în sarcină se aproximează conform relației (6.28), vol. I

$$P_{sFe} = 0{,}005 P_N \cdot 10^3 = \qquad P_{sFe} = 0{,}005 \cdot 400 \cdot 10^3 =$$
$$= 0{,}005 \cdot 440 \cdot 10^3 = 2\,200 \text{ W} = \qquad = 2\,000 \text{ W} = 2 \text{ kW}.$$
$$= 2{,}2 \text{ kW}. \qquad (2.124)$$

7. *Pierderile suplimentare electrice*, la funcționarea în sarcină (datorită fenomenului de refulare) se neglijează, deoarece dimensiunea pe înălțimea crestăturii a conductorului înfășurării indusului ($h_{Cu} = 0{,}112$) cm este mică.

8. *Pierderile totale și randamentul mașinii*

a) pierderile totale

$$\Sigma P = P_{Fe} + P_{el} + P_{mec} + P_c + \qquad \Sigma P = 4{,}96 + 17{,}29 + 2{,}94 +$$
$$+ P_{sFe} = 4{,}71 + 16{,}83 + \qquad + 1{,}15 + 2 = 28{,}34 \text{ kW}.$$
$$+ 2{,}94 + 1{,}26 + 2{,}2 = \qquad (2.125)$$
$$= 27{,}94 \text{ kW}.$$

b) Randamentul mașinii la funcționarea în sarcină nominală

$$\eta_N = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_N}{P_N + \Sigma P} = \qquad \eta_N = \frac{400}{400 + 28{,}34} = 0{,}934$$
$$= \frac{440}{440 + 27{,}94} = 0{,}94 \qquad (2.126)$$

apropiat de valoarea estimată inițial.

2.14. CALCULUL CARACTERISTICILOR DE PORNIRE ÎN ASINCRON ALE MOTORULUI SINCRON

A. Cazul în care parametrii nu sînt afectați de saturația magnetică

Valorile parametrilor motorului, în unități relative și raportați la stator, sînt :

$r_1 = 0{,}0246$ u.r. ; $r_e = 0{,}035$ u.r.

$x_{\sigma 1} = 0{,}087$ u.r. ; $x_{\sigma e} = 0{,}253$ u.r.

$x_{ad} = 1{,}28$ u.r. ; $r_d = 0{,}31$ u.r.

$x_{aq} = 0{,}69$ u.r. ; $x_{\sigma d} = 0{,}32$ u.r.

$x_d = 1{,}37$ u.r. ; $r_q = 0{,}119$ u.r.

$x_q = 0{,}78$ u.r. ; $x_{\sigma q} = 0{,}065$ u.r.

Se parcurg toate etapele de calcul pentru alunecarea $s = 1$, după care pentru diferite valori ale alunecării, se întocmește tabelul 2.4 după modelul tabelului 1.10.

a) Determinarea elementelor schemei echivalente conform relațiilor (1.200) :

— impedanța complexă a înfășurării de amortizare, după axa longitudinală

$$\underline{z}_{\sigma d} = \frac{r_d}{s} + jx_{\sigma d} = \frac{0{,}31}{1} + j0{,}32 = 0{,}31 + j0{,}32 \text{ u.r.} ; \quad (2.127)$$

— impedanța complexă a înfășurării de amortizare, după axa transversală

$$\underline{z}_{\sigma q} = \frac{r_e}{s} + jx_{\sigma q} = \frac{0{,}119}{1} + j0{,}065 = 0{,}119 + j0{,}065 \text{ u.r.} ; \quad (2.127 \text{ a})$$

— impedanța complexă a înfășurării de excitație

$$\underline{z}_{\sigma e} = \frac{r_e}{s} + jx_{\sigma e} = \frac{0{,}035}{1} + j0{,}253 = 0{,}035 + j0{,}253 \text{ u.r.} \quad (2.128)$$

b) Determinarea impedanțelor echivalente, conform figurii 1.54 și relațiilor (1.200 c) :

— după axa longitudinală

$$\underline{z}_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma d}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma e}}} = \frac{1}{\frac{1}{j1{,}28} + \frac{1}{0{,}31 + j0{,}32} + \frac{1}{0{,}035 + j0{,}253}} =$$

$$= \frac{1}{-j0{,}78 + 1{,}56 - j1{,}61 + 0{,}536 - j3{,}87} = \frac{1}{2{,}096 - j6{,}26} =$$

$$= 0{,}048 + j0{,}143 \text{ u.r.} ; \quad (2.129)$$

— după axa transversală

$$\underline{z}_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma q}}} = \frac{1}{\frac{1}{j0{,}69} + \frac{1}{0{,}119 + j0{,}065}} =$$

$$= \frac{1}{-j1{,}44 + 6{,}47 - j3{,}53} = \frac{1}{6{,}47 - j4{,}97} = 0{,}097 + j0{,}074 \text{ u.r.}$$

(2.129 a)

c) Determinarea impedanțelor complexe pentru componentele de succesiune directă și inversă, după cele două axe :

— pentru componenta de succesiune directă, conform relațiilor (1.200 a)

$$\underline{z}_{d1} = \underline{z}_{ad} + r_1 + jx_{\sigma_1} = 0{,}048 + j0{,}143 + 0{,}0246 + j0{,}087 =$$

$$= 0{,}0726 + j0{,}23 \text{ u.r.} ; \quad (2.130)$$

$$\underline{z}_{q1} = \underline{z}_{aq} + r_1 + jx_{\sigma_1} = 0{,}097 + j0{,}074 + 0{,}0246 + j0{,}087 =$$

$$= 0{,}121 + j0{,}161 \text{ u.r.} ;$$

— pentru componenta de succesiune inversă, conform relațiilor (1.200 b)

$$\underline{z}_{d3} = \underline{z}_{ad} + \frac{r_1}{2s - 1} + jx_{\sigma_1} = 0{,}048 + j0{,}143 + \frac{0{,}0246}{2 \cdot 1 - 1} + j0{,}087 =$$

$$= 0{,}0726 + j0{,}23 \text{ u.r.} ; \quad (2.130 \text{ a})$$

$$\underline{z}_{q3} = \underline{z}_{aq} + \frac{r_1}{2s - 1} + jx_{\sigma_1} = 0{,}097 + j0{,}074 + \frac{0{,}0246}{2 \cdot 1 - 1} + j0{,}087 =$$

$$= 0{,}121 + j0{,}161 \text{ u.r.}$$

d) Determinarea impedanței echivalente, conform relației (1.205)

$$\underline{z}_{2e} = \frac{1}{2}\left[(\underline{z}_{ad} + \underline{z}_{aq}) - \frac{(\underline{z}_{ad} - \underline{z}_{aq})^2}{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{q3}}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[(0{,}048 + j0{,}143 + 0{,}097 + j\,0{,}074) - \right.$$

$$\left. - \frac{(0{,}048 + j0{,}143 - 0{,}097 - j0{,}074)^2}{0{,}0726 + j0{,}23 + 0{,}121 + j0{,}161}\right] = \qquad (2.131)$$

$$= \frac{1}{2}\left[0{,}145 + j0{,}217 - \frac{(-0{,}049 + j\,0{,}069)^2}{0{,}193 + j0{,}391}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[0{,}145 + j0{,}217 - \frac{-0{,}0023 - j0{,}0067}{0{,}193 + j0{,}391}\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left[0{,}145 + j0{,}217 + \frac{0{,}00306 + j0{,}000393}{0{,}193^2 + 0{,}391^2}\right] = 0{,}0806 + j0{,}11 \text{ u.r.}$$

de unde rezultă:

$$r_{2e} = 0{,}0806 \text{ u.r.} \qquad (2.131\text{ a})$$

e) Determinarea valorilor complexe ale curenților de succesiune directă și inversă, conform relațiilor (1.201), considerînd că pornirea se face la tensiunea nominală, cînd $U = U_N = 1$ u.r.

$$\underline{I}_1 = \underline{U}\,\frac{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{q3}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{q1}} =$$

$$= 1 \cdot \frac{0{,}0726 + j0{,}23 + 0{,}121 + j0{,}161}{(0{,}0726 + j0{,}23)(0{,}121 + j0{,}161) + (0{,}0726 + j0{,}23)(0{,}121 + j0{,}161)} =$$

$$= \frac{0{,}1936 + j0{,}391}{-0{,}0564 + j0{,}079} = \frac{(0{,}1936 + j0{,}391)(-0{,}0564 - j0{,}079)}{0{,}0564^2 + 0{,}079^2} =$$

$$= \frac{0{,}01996 - j0{,}0373}{0{,}0564^2 + 0{,}079^2} = 2{,}1 - j3{,}94 \text{ u.r.}; \qquad (2.132)$$

$$\underline{I}_3 = -\underline{U}\,\frac{\underline{z}_{d1} - \underline{z}_{q1}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{q1}} = -1 \cdot \frac{0{,}0726 + j0{,}23 - 0{,}121 - j0{,}161}{-0{,}0564 + j0{,}079} =$$

$$= \frac{0{,}0484 - j0{,}069}{-0{,}0564 + j0{,}079} = -0{,}86 + j0{,}0072 \text{ u.r.} \qquad (2.132\text{ a})$$

f) Patratul modulelor curenților de succesiune directă și inversă, în unități relative

$$\underline{I}_1^2 = \underline{I}_{1a}^2 + \underline{I}_{1r}^2 = 2{,}1^2 + 3{,}94^2 = 20{,}04; \qquad (2.132\text{ b})$$

$$\underline{I}_3^2 = \underline{I}_{3a}^2 + \underline{I}_{3r}^2 = 0{,}86^2 + 0{,}0072^2 = 0{,}7396 \approx 0{,}740.$$

g) Valoarea medie a cuplului electromagnetic de pornire, conform relației (1.207)

$$\underset{\sim}{M}_p = \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N}\left(r_{2e}\underline{I}_1^2 + \frac{r_1}{2s-1}\underline{I}_3^2\right) =$$

$$= \frac{1}{0{,}934 \cdot 0{,}9}\left((0{,}0806 \cdot 20{,}04 + \frac{0{,}0246}{2 \cdot 1 - 1} \cdot 0{,}740\right) = 1{,}94 \text{ u.r.},$$

(2.133)

h) Curentul de pornire, în unități relative, conform relației (1.208)

$$\underline{I}_p = \sqrt{\underline{I}_1^2 + \underline{I}_3^2} = \sqrt{20{,}04 + 0{,}74} = 4{,}55 \text{ u.r.} \qquad (2.133\text{ a})$$

Cum se observă atît cuplul de pornire $\underset{\sim}{M}_p$ cît și curentul de pornire $\underline{I}_p$ se încadrează în limitele impuse prin temă.

i) Curentul din înfășurarea de excitație în timpul pornirii în asincron, pentru $s = 1$, în unități relative, conform relației (1.210)

$$\underline{I}_{ex} = \sqrt{(\underline{I}_{1a} + \underline{I}_{3a})^2 + (\underline{I}_{1r} + \underline{I}_{3r})^2} \cdot \frac{|\underline{z}_{ad}|}{|\underline{z}_{ae}|} =$$

$$= \sqrt{(2{,}1 - 0{,}86)^2 + (-3{,}94 + 0{,}0072)^2} \cdot \frac{|0{,}048 + j0{,}143|}{|0{,}035 + j0{,}253|} =$$

$$= \sqrt{1{,}242^2 + 3{,}942^2} \cdot \frac{0{,}1508}{0{,}255} = 2{,}45 \text{ u.r.} \qquad (2.134)$$

sau, în A, conform relației (1.210 a)

$$I_{ex} = \underline{I}_{ex}\,\frac{k_{ad}F_a}{2\sqrt{2}w_e} = 2{,}45 \cdot \frac{0{,}875 \cdot 9\,120}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 63} = 109{,}7 \text{ A.} \qquad (2.134\text{ a})$$

Calculul caracteristicilor de pornire în asincron, pentru diferitele alunecări, cuprinse între $s = 1$ și $s = 0{,}05$ sînt efectuate în tabelul 2.4, cu ajutorul căruia se trasează caracteristicile de pornire, indicate în figura 2.7.

Valorile obținute pentru caracteristicile de pornire se încadrează în limitele impuse prin temă.

OBSERVAȚIE. După cum se vede, pentru alunecarea $s = 0{,}5$ metoda de față elimină nedeterminările existente în celelalte metode [11], [13].

Astfel, dacă $s = 0{,}5$ cînd $\underline{z}_{d3} = \infty$ și $\underline{z}_{q3} = \infty$ rezultă:

a) $$\underline{z}_{2e} = \frac{1}{2}\left[(\underline{z}_{ad} + \underline{z}_{aq}) - \frac{(\underline{z}_{ad} - \underline{z}_{aq})^2}{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{q3}}\right] = \frac{1}{2}(\underline{z}_{ad} + \underline{z}_{aq}) \text{ u.r.}];$$

(2.135)

TABELUL 2.4

DATE	$s = 1$	$s = 0{,}55$	$s = 0{,}5$	$s = 0{,}45$	$s = 0{,}25$	$s = 0{,}1$	$s = 0{,}05$
1	2	3	4	5	6	7	8
$\underline{z}_{\sigma d} = \frac{r_d}{s} + jx_{\sigma d}$ [u.r.]	$0{,}31+j0{,}32$	$0{,}563+j0{,}32$	$0{,}62+j0{,}32$	$0{,}688+j0{,}32$	$1{,}24+j0{,}32$	$3{,}1+j0{,}32$	$6{,}19+j0{,}32$
$\underline{z}_{\sigma q} = \frac{r_q}{s} + jx_{\sigma q}$ [u.r.]	$0{,}119+j0{,}065$	$0{,}216+j0{,}065$	$0{,}238+j0{,}065$	$0{,}264+j0{,}065$	$0{,}476+j0{,}065$	$1{,}19+j0{,}065$	$2{,}38+j0{,}065$
$\underline{z}_{\sigma e} = \frac{r_e}{s} + jx_{\sigma e}$ [u.r.]	$0{,}035+j0{,}253$	$0{,}063+j0{,}253$	$0{,}07+j0{,}253$	$0{,}077+j0{,}253$	$0{,}14+j0{,}253$	$0{,}35+j0{,}253$	$0{,}7+j0{,}253$
$\underline{z}_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{ad}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma d}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma e}}}$ [u.r.]	$0{,}048+j0{,}143$	$0{,}069+j0{,}160$	$0{,}073+j0{,}163$	$0{,}077+j0{,}166$	$0{,}11+j0{,}182$	$0{,}23+j0{,}227$	$0{,}397+j0{,}347$
$\underline{z}_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{jx_{aq}} + \frac{1}{\underline{z}_{\sigma q}}}$ [u.r.]	$0{,}097+j0{,}074$	$0{,}167+j0{,}107$	$0{,}18+j0{,}116$	$0{,}196+j0{,}128$	$0{,}284+j0{,}238$	$0{,}285+j0{,}509$	$0{,}181+j0{,}632$
$\frac{\lvert \underline{z}_{ad} \rvert}{\lvert \underline{z}_{\sigma e} \rvert}$	0,592	0,668	0,68	0,692	0,738	0,749	0,709
$\underline{z}_{d1} = \underline{z}_{ad} + r_1 + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]	$0{,}0726+j0{,}23$	$0{,}093+j0{,}24$	$0{,}097+j0{,}25$	$0{,}102+j0{,}253$	$0{,}135+j0{,}269$	$0{,}254+j0{,}314$	$0{,}422+j0{,}434$

TABELUL 2.4 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8
$\underline{z}_{q1} = \underline{z}_{aq} + r_1 + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]	$0{,}121+j0{,}161$	$0{,}191+j0{,}194$	$0{,}205+j0{,}203$	$0{,}22+j0.215$	$0{,}309+j0{,}325$	$0{,}309+j0{,}59$	$0{,}20+j0{,}719$
$\underline{z}_{d3} = \underline{z}_{ad} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]	$0{,}0726+j0{,}23$	$0{,}315+j0{,}247$	∞	$-0{,}168+j0{,}253$	$0{,}061+j0{,}269$	$0{,}199+j0{,}314$	$0{,}37+j0{,}434$
$\underline{z}_{q3} = \underline{z}_{aq} + \frac{r_1}{2s-1} + jx_{\sigma 1}$ [u.r.]	$0{,}121+j0{,}161$	$0{,}413+j0{,}194$	∞	$-0{,}049+j0{,}215$	$0{,}235+j0{,}325$	$0{,}254+j0{,}59$	$0{,}154+j0{,}719$
$\underline{z}_{2e} = \frac{1}{2}\left[(\underline{z}_{ad} + \underline{z}_{aq}) - \frac{(\underline{z}_{ad} - \underline{z}_{aq})^2}{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{q3}}\right] = r_{2e} + jx_{2e}$ [u.r.]	$0{,}0806+j0{,}11$	$0{,}117+j0{,}14$	$0{,}126+j0{,}139$	$0{,}15+j0{,}154$	$0{,}175+j0{,}22$	$0{,}26+j0{,}32$	$0{,}339+j0{,}497$
$\underline{I}_1 = \underline{U}\frac{\underline{z}_{d3} + \underline{z}_{q3}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{q1}} = \underline{I}_{1a} + j\underline{I}_{1r}$ [u.r.]	$2{,}1-j3{,}94$	$1{,}97-j3{,}15$	$2{,}03-j3{,}04$	$1{,}96-j2{,}71$	$1{,}47-j2{,}27$	$1{,}12-j1{,}63$	$0{,}767-j1{,}23$
$\underline{I}_3 = -\underline{U}\frac{\underline{z}_{d1} - \underline{z}_{q1}}{\underline{z}_{d1}\underline{z}_{q3} + \underline{z}_{d3}\underline{z}_{q1}} = \underline{I}_{3a} + j\underline{I}_{3r}$ [u.r.]	$-0{,}86+j0{,}0072$	$-0{,}224-j0{,}43$	0	$-0{,}80+j0{,}094$	$-0{,}163-j0{,}72$	$0{,}428-j0{,}359$	$0{,}408+j0{,}025$

Tabelul 2.4 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8
$\underset{\sim}{I}_1^2 = \underset{\sim}{I}_{1a}^2 + \underset{\sim}{I}_{1r}^2$	20,04	13,83	13,45	11,23	7,37	3,93	2,1
$\underset{\sim}{I}_3^2 = \underset{\sim}{I}_{3a}^2 + \underset{\sim}{I}_{3r}^2$	0,740	0,235	0	0,659	0,55	0,312	0,167
$\underset{\sim}{M} = \underset{\sim}{M}_{med} = \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N}\left(r_{2r}\underset{\sim}{I}_1^2 + \frac{r_1}{2s-1}\underset{\sim}{I}_3^2\right)$ [u.r.]	1,94	2,01	2,03	1,81	1,5	1,21	0,84
$\underset{\sim}{I} = \sqrt{\underset{\sim}{I}_1^2 + \underset{\sim}{I}_3^2}$ [u.r.]	4,55	3,75	3,66	3,44	2,81	2,06	1,5
$\underset{\sim}{I}_{ex} = \sqrt{(\underset{\sim}{I}_{1a}+\underset{\sim}{I}_{3a})^2+(\underset{\sim}{I}_{1r}+\underset{\sim}{I}_{3r})^2}\cdot\frac{\lvert\underset{\sim}{Z}_{ad}\rvert}{\lvert\underset{\sim}{Z}_{\sigma r}\rvert}$ [u.r.]	2,45	2,66	2,49	1,98	2,42	1,89	1,19
$I_{ex} = \underset{\sim}{I}_{ex}\frac{k_{ad}F_a}{2\sqrt{2}\,w_s}$ [A]	109,7	119,4	111,7	88,8	108,48	84,9	53,5

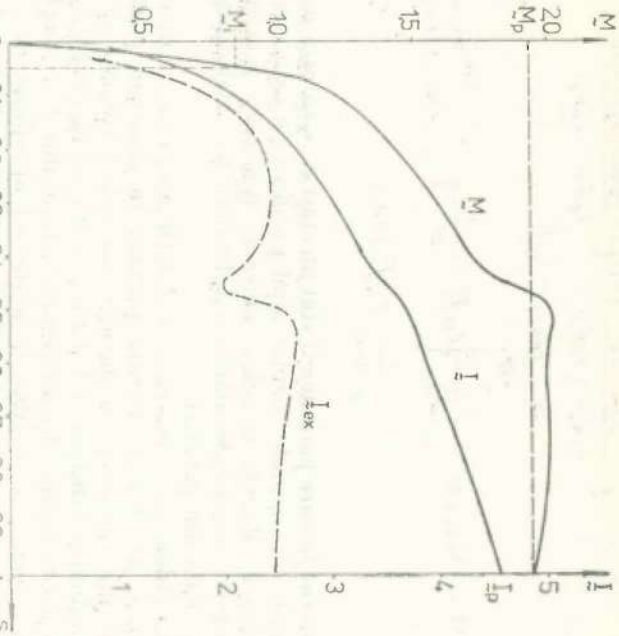


Fig. 2.7 — Caracteristicile de pornire în asincron ale motorului sincron de 400 kW; 6 kV; 1 000 rot/min, cu poli aparenți.

Notă: Caracteristicile au fost trasate cu calculatorul electronic pentru valori ale alunecării cuprinse între $s=1$ și $s=0$, cu un pas de 0,01.

b)

$$\underset{\sim}{I}_1 = \underset{\sim}{U}\frac{\underset{\sim}{Z}_{d3}+\underset{\sim}{Z}_{q3}}{\underset{\sim}{Z}_{d1}\underset{\sim}{Z}_{q3}+\underset{\sim}{Z}_{d3}\underset{\sim}{Z}_{q1}} =$$

$$= \underset{\sim}{U}\frac{\underset{\sim}{Z}_{ad}+\frac{r_1}{2s-1}+jx_{\sigma 1}+\underset{\sim}{Z}_{aq}+\frac{r_1}{2s-1}+jx_{\sigma 1}}{\underset{\sim}{Z}_{a1}\left(\underset{\sim}{Z}_{aq}+\frac{r_1}{2s-1}+jx_{\sigma 1}\right)+\underset{\sim}{Z}_{q1}\left(\underset{\sim}{Z}_{ad}+\frac{r_1}{2s-1}+jx_{\sigma 1}\right)} =$$

$$= \underset{\sim}{U}\frac{\underset{\sim}{Z}_{ad}(2s-1)+2r_1+\underset{\sim}{Z}_{aq}(2s-1)+j2x_{\sigma 1}(2s-1)}{\underset{\sim}{Z}_{a1}[\underset{\sim}{Z}_{aq}(2s-1)+r_1+jx_{\sigma 1}(2s-1)]+\underset{\sim}{Z}_{q1}[\underset{\sim}{Z}_{ad}(2s-1)+r_1+jx_{\sigma 1}(2s-1)]} =$$

$$= \underset{\sim}{U}\frac{2r_1}{\underset{\sim}{Z}_{a1}r_1+\underset{\sim}{Z}_{q1}r_1} = \underset{\sim}{U}\frac{2}{\underset{\sim}{Z}_{a1}+\underset{\sim}{Z}_{q1}}\ [\text{u.r.}]\ ; \qquad (2.135\ a)$$

c) $$\underline{I}_3 = -\underline{U}\frac{\bar{z}_{d1} - \bar{z}_{q1}}{\bar{z}_{d1}\bar{z}_{q3} + \bar{z}_{d3}\bar{z}_{q1}} = \underline{U}\frac{\bar{z}_{q1} - \bar{z}_{d1}}{\bar{z}_{d1}\bar{z}_{q3} + \bar{z}_{d3}\bar{z}_{q1}} =$$

$$= \frac{(2s-1)(\bar{z}_{aq} - \bar{z}_{ad})}{r_1(\bar{z}_{d1} + \bar{z}_{q1})} = 0\,; \qquad (2.135\ b)$$

d) $$\underline{M} = \underline{M}_{med} = \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N}\left[r_{2e}\underline{I}_1^2 + \frac{r_1}{2s-1}\cdot\frac{(2s-1)^2(\bar{z}_{aq} - \bar{z}_{ad})^2}{r_1^2(\bar{z}_{d1} + \bar{z}_{q1})^2}\right] =$$

$$= \frac{1}{\eta_N \cos\varphi_N} r_{2e}\underline{I}_1^2\ [\text{u.r.}]. \qquad (2.135\ c)$$

B. **Cazul în care parametrii sînt afectaţi de saturaţia magnetică**

Situaţia corespunde cazului cînd pornirea în asincron se face prin cuplarea directă la reţea, adică la tensiunea nominală U_{1N} şi se doreşte o precizie mărită a calculului (cît mai apropiată de situaţia reală din maşină).

Este evident că afectarea de saturaţia magnetică a reactanţelor de scăpări, are loc pe durata pornirii în asincron pentru care curentul din înfăşurări se menţine la valori ridicate ($I \geqslant 3I_N$). Din examinarea tabelului 2.4 şi a figurii 2.7, se observă că valoarea relativă a curentului din înfăşurarea statorului $\underline{I}$, se menţine mai mare sau egală cu 3, pînă la alunecări apropiate de $s = 0{,}26$. Aceasta înseamnă că reactanţele de scăpări sînt afectate de saturaţie pe domeniul alunecărilor cuprins între $s = 1$ şi $s = 0{,}25$, după care (pentru alunecări $s < 0{,}25$) saturaţia se poate neglija.

Deoarece, interesează cel mai mult, se vor avea în vedere numai *caracteristicile de pornire corespunzătoare alunecării* $s = 1$, care sînt dealtfel impuse prin temă.

Valorile saturate ale reactanţelor se determină conform paragrafului 1.16.

Astfel, reactanţele utile corespunzătoare fluxului de reacţie a indusului, valori saturate, după cele două axe sînt:

— după axa longitudinală, conform relaţiei (1.212)

$$x_{ads} = k_{sd}x_{ad} = 0{,}978 \cdot 1{,}28 = 1{,}25 \text{ u.r.}\,; \qquad (2.136)$$

— după axa transversală, conform relaţiei (1.212 a)

$$x_{aqs} = k_{sq}x_{aq} = 0{,}9 \cdot 0{,}69 = 0{,}62 \text{ u.r.}\,; \qquad (2.136\ a)$$

Reactanţa de scăpări a statorului, valoarea saturată, conform relaţiei (1.213)

$$x_{\sigma 1s} = x_{\sigma 1}\frac{\sum\lambda_{1s}}{\sum\lambda_1} = 0{,}087\,\frac{3{,}22}{3{,}33} = 0{,}084 \text{ u.r.} \qquad (2.136\ b)$$

în care, conform relaţiei (1.214)

$$\sum\lambda_{1s} = \lambda_{c1s} + \lambda_{d1s} + \lambda_{z1} + \lambda_{f1} =$$

$$= 1{,}53 + 0{,}329 + 0{,}246 + 1.12 = 3{,}22$$

unde:

— permeanţa specifică de scăpări în crestătură, valoare saturată, conform relaţiei (1.215) (vezi şi relaţia (2.53))

$$\lambda_{c1s} = \frac{h_1 - h_4}{3b_c}k_\beta + \frac{h_2}{b_c''}k_\beta' + \frac{h_4}{4b_c} =$$

$$= \frac{37 - 5{,}6}{3 \cdot 11} \cdot 0{,}906 + \frac{7{,}95}{12{,}78} \cdot 0{,}875 + \frac{5{,}6}{4 \cdot 11} = 1{,}53$$

cu, valoarea majorată a lăţimii istmului, conform relaţiei (1.215 a)

$$b_c'' = b_c + \frac{b_{d\min}}{\mu'} = 11 + \frac{12{,}5}{7} = 12{,}78 \text{ mm}$$

şi în care, permeabilitatea relativă echivalentă, conform relaţiei (1.215 b) este

$$\mu' = \frac{B_{dz}}{\mu_0(H_{dz} + \underline{I}_p A_N)} = \frac{2{,}04}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}(300 \cdot 10^2 + 5 \cdot 403{,}5 \cdot 10^2)} = 7$$

unde s-a considerat $\underline{I}_p \approx 5$ (ceva mai mare decît cel rezultat din tabelul 2.4);

— permeanţa specifică a scăpărilor diferenţiale, valoare saturată, conform relaţiei (1.216)

$$\lambda_{d1s} = \frac{\lambda_{d1}}{k_{sp}} = \frac{0{,}344}{1{,}044} = 0{,}329$$

unde, conform relaţiei (1.216 a)

$$k_{sp} = \frac{U_{m\delta} + U_{md1}}{U_{m\delta}} = \frac{6\,144 + 275{,}5}{6\,144} = 1{,}044.$$

Reactanţele sincrone, valori saturate, sînt:

— longitudinală

$$x_{ds} = x_{ads} + x_{\sigma 1s} = 1{,}25 + 0{,}084 = 1{,}33 \text{ u.r.}\,;$$

— transversală (2.136 c)

$$x_{qs} = x_{aqs} + x_{\sigma 1s} = 0{,}62 + 0{,}084 = 0{,}7 \text{ u.r.}$$

Reactanțele de scăpări ale coliviei de amortizare (pornire), valori saturate, sînt :

— după axa longitudinală, conform relației (1.218) (vezi și relația (2.93))

$$x_{\sigma ds} = \frac{\pi[\mu_0 F_\delta}{\Phi_{1N}} [l_{Fe2}(\lambda_{cas} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_d] \frac{1}{4C_D} + \sigma_{ad} x_{ads} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9\,120}{7 \cdot 10^{-2}} [0{,}59(1{,}16 + 0{,}7) + 0{,}3 \cdot 0{,}282 \cdot 1{,}3] \frac{1}{4 \cdot 1{,}3} +$$

$$+ 0{,}14 \cdot 1{,}25 = 0{,}29 \text{ u.r.} \qquad (2.136\ d)$$

unde, conform relației (1.217) (vezi și relațiile (2.93 a))

$$\lambda_{cas} = \left(0{,}785 - \frac{b_0}{2d_a}\right) + \frac{h_0}{b_0''} = \left(0{,}785 - \frac{2{,}5}{2 \cdot 8}\right) + \frac{2{,}5}{4{,}64} = 1{,}16$$

cu valoarea majorată a lățimii istmului crestăturii de amortizare, conform relației (1.217 b)

$$b_0'' = b_0 + \frac{b_{d0}}{\mu'} = 2{,}5 + \frac{15}{7} = 4{,}64 \text{ mm}$$

unde :

$$b_{d0} = t_a - b_0 = 17{,}5 - 2{,}5 = 15 \text{ mm} ;$$

— după axa transversală, conform relației (1.219) (vezi și relația (2.94))

$$x_{\sigma qs} = \frac{\pi[\mu_0 F_\delta}{\Phi_{1N}} [l_{Fe2}(\lambda_{cas} + \lambda_{da}) + \lambda_{fa}\tau C_q] \frac{1}{4C_Q} + \sigma_{aq} x_{aqs} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9\,120}{7 \cdot 10^{-2}} [0{,}59(1{,}16 + 0{,}7) + 0{,}3 \cdot 0{,}282 \cdot 3] \frac{1}{4 \cdot 3{,}6} +$$

$$+ 0{,}01 \cdot 0{,}62 = 0{,}054 \text{ u.r.} \qquad (2.136\ e)$$

Rezultă deci că valorile parametrilor motorului, considerînd și influența saturației magnetice, în unități relative și raportați la stator, sînt :

r_1	= 0,0246	u.r. ;	r_e	= 0,035	u.r. ;
$x_{\sigma 1s}$	= 0,084	u.r. ;	$x_{\sigma e}$	= 0,253	u.r. ;
x_{ads}	= 1,25	u.r. ;	r_d	= 0,31	u.r. ;
x_{aqs}	= 0,62	u.r. ;	$x_{\sigma ds}$	= 0,29	u.r. ;
x_{ds}	= 1,33	u.r. ;	r_q	= 0,119	u.r. ;
x_{qs}	= 0,7	u.r. ;	$x_{\sigma qs}$	= 0,054	u.r..

Cu aceste valori se reiau toate etapele de calcul pentru alunecarea $s = 1$, rezultînd următoarele valori pentru caracteristicile de pornire :

$$\underset{\sim}{M}_p = 2{,}12 \text{ u.r.} ; \qquad (2.136\ f)$$

$$\underset{\sim}{I}_p = 4{,}7 \text{ u.r.}$$

care se încadrează în limitele impuse prin temă.

În comparație cu valorile date de relațiile (2.133) și (2.133 a) corespunzătoare parametrilor neafectați de saturația magnetică, noile valori pentru $\underset{\sim}{I}_p$ și $\underset{\sim}{M}_p$, sînt ceva mai mari ceea ce era de așteptat, acestea fiind de fapt și valorile reale ale caracteristicilor de pornire.

CAZUL 2. Să se proiecteze un :

GENERATOR SINCRON TRIFAZAT	MOTOR SINCRON TRIFAZAT

cu aceleași date nominale ca în cazul 1, diferind doar construcția rotorului, care este în *variantă combinată*, cu aceeași lățime a piesei polare ca și la polii aparenți.

Vederea unor rotoare în variantă combinată (pe același arbore) este indicată în figura 2.8 a.

La *dimensionarea statorului* toate elementele de calcul sînt identice ca în cazul 1, cu deosebirea coeficientului de acoperire ideală α_i, care conform paragrafului 1.1.5 B este :

$$\alpha_i = (1{,}06 \div 1{,}08)\alpha_{i\text{pol.apar.}}$$

Se va lua

$$\alpha_i = 1{,}07\alpha_{i\text{pol.apar.}} = 1{,}07 \cdot 0{,}61 = 0{,}65$$

unde, conform relației (2.5)

$$\alpha_{i\text{pol.apar.}} = 0{,}61.$$

Dacă s-ar lua același stator ca în cazul 1 ar rezulta în baza relației (2.27) valori ale inducției în întrefier mult mai mici decît cele date de relația (2.28) adică

$$B_\delta = \frac{0{,}78}{1{,}07} = 0{,}73 \text{ T} \qquad \Big| \qquad B_\delta = \frac{0{,}8}{1{,}07} = 0{,}747 \text{ T}$$

ceea ce ar corespunde unei mașini cu solicitări magnetice mult sub limite.

De aceea se recalculează statorul (sumar, deoarece calculele de detaliu sînt similare ca în cazul 1), pentru încadrarea în limite a solicitărilor electromagnetice, considerînd aceleași diametre D și D_e, precum și același număr de crestături Z_1.

2.15. DIMENSIONAREA STATORULUI

1. *Lungimea ideală*, conform relației (1.15) și (2.10) însă cu $D = 54$ cm, cît a fost recalculat și în cazul 1 (vezi relația (2.26)

$$l_i = \frac{60 S_{iN}}{k_{CA}\pi^2 D^2 n_1 A B_\delta} = \frac{60 \cdot 500 \cdot 10^3}{0{,}67 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}54^2 \cdot 1\,000 \cdot 407 \cdot 10^2 \cdot 0{,}8} =$$

$$= 0{,}477 \text{ m} \approx 47{,}5 \text{ cm} \qquad (2.137)$$

unde :

$$k_{CA} = \frac{\pi k_w}{2\sqrt{2}} \alpha_i = \frac{\pi \cdot 0{,}926}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 0{,}65 = 0{,}67.$$

2. *Geometria miezului*

Se iau

$$n_v = 7\ ;\ b_v = 1 \text{ cm, deci } b'_v = 0{,}5 b_v = 0{,}5 \text{ cm}$$

și rezultă, conform relațiile (1.16) și (1.16 a):

— lungimea geometrică

$$l_g = l_i + n_v b'_v = 47{,}5 + 7 \cdot 0{,}5 = 51 \text{ cm} ;$$

— lungimea totală a pachetelor de fier :

$$l_{Fe} = l_g - n_c b_c = 51 - 7 \cdot 1 = 44 \text{ cm} ; \qquad (2.137 \text{ a})$$

— lungimea pachetului de fier :

$$l_1 = \frac{l_{Fe}}{n_c + 1} = \frac{44}{7 + 1} = 5{,}5, \text{ cm.}$$

Verificarea lui λ

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{47{,}5}{28{,}2} = 1{,}68$$

adică în limite.

3. *Elementele înfășurării*

— Ca și în cazul polilor aparenți se mențin

$$q = 4\ ;\ Z_1 = 72\ ;\ t_1 = 2{,}35 \text{ cm.}$$

— Numărul de conductoare în crestătură se stabilește ceva mai mare ca în cazul 1, deoarece se poate lua o pătură de curent mai mare, mașina cu rotorul în variantă combinată răcindu-se mai bine decît cea cu poli aparenți (piesele polare pot fi considerate ca paletele unui ventilator care antrenează aerul din canalele radiale ale rotorului).

Se alege deci, față de relația (2.19)

$$n_c = 23 \quad | \quad n_c = 21. \qquad (2.138)$$

— Numărul de spire pe fază, conform relației (1.25), considerînd $a = 1$

$$w = \frac{Z_1 n_c}{2ma} = \frac{72 \cdot 23}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 276. \quad | \quad w = \frac{72 \cdot 21}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 252. \qquad (2.138 \text{ a})$$

După cum se observă, atît la generator cît și la motor n_c este număr impar, ceea ce înseamnă că vor fi bobine neegale. În acest caz, pentru a avea în fiecare crestătură o latură a unei bobine mari și o latură a unei bobine mici (vezi fig. 1.15 b) este necesar fie a se alege pasul înfășurării y_1 (vezi relația (1.17) număr impar (în cazul de față 9 sau 11) care s-ar abate mai mult de la scurtarea recomandată ($y_1 = (5/6) y_\tau = 10$ — conform relației (2.17)), fie se execută înfășurarea în grupe de cîte două bobine mari și două bobine mici (vezi fig. 1.15 c), însă pasul trebuie ales un număr multiplu de 2 (numărul de bobine din grup), impar. În cazul de față dacă se ia același pas dat de relația (2.17) se obține numărul multiplu de 2

$$\frac{y_1}{2} = \frac{10}{2} = 5 = \text{număr impar} \qquad (2.138 \text{ b})$$

ceea ce trebuia.

În consecință, înfășurarea va avea același pas $y_1 = 10$ și același factor de înfășurare $k_w = 0{,}926$ ca și mașina cu poli aparenți, bobinarea făcîndu-se însă cu grupe de cîte două bobine mari și două bobine mici (la $y_1 =$ număr impar se puteau lua cîte o bobină mare și una mică).

4. *Verificări necesare*

— Pătura de curent

$$A = \frac{n_c I_N}{a t_1} = \frac{23 \cdot 40{,}32}{1 \cdot 2{,}35} = \quad | \quad A = \frac{21 \cdot 45{,}6}{2 \cdot 2{,}35} = 407 \text{ A/cm.}$$

$$= 395 \text{ A/cm.} \qquad (2.139)$$

— Fluxul maxim util la sarcină nominală (Φ_N pentru E_{1N}) pe pol se recalculează din relația (2.22) pentru noul număr de spire

$$\Phi = 7{,}04 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{264}{276} = 6{,}73 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad \Phi = 7{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{240}{252} = 6{,}85 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad (2.140)$$

— Fluxul nominal la funcționarea în gol (pentru U_{1N})

$$\Phi_{0N} = \frac{\Phi}{k_E} = \frac{6{,}73 \cdot 10^{-2}}{1{,}08} = 6{,}23 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad \Phi_{0N} = \frac{6{,}85 \cdot 10^{-2}}{1{,}055} = 6{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad (2.140\text{ a})$$

— Fluxul undei fundamentale a inducției, pentru tensiunea nominală, se recalculează din relația (2.22 b) pentru noul număr de spire

$$\Phi_{1N} = 6{,}7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{264}{276} = 6{,}4 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad \Phi_{1N} = 7 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{240}{252} = 6{,}66 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad (2.140\text{ b})$$

— Inducția maximă în întrefier conform relației (1.27)

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{6{,}73 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}475} = 0{,}773 \text{ T.} \qquad B_\delta = \frac{6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}475} = 0{,}786 \text{ T.} \qquad (2.141)$$

Deoarece au rezultat valori mai mici decît cele impuse se stabilește

$$B_\delta = 0{,}8 \text{ T}$$

și se recalculează lungimea ideală și geometria miezului.

Rezultă astfel, pentru mașina mai solicitată (motorul)

$$l_i = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau B_\delta} = \frac{6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}8} = 0{,}467 \text{ m} \approx 47 \text{ cm};$$

$$l_g = l_i + n_v b'_v = 47 + 7 \cdot 0{,}5 = 50{,}5 \text{ cm}; \qquad (2.142)$$

$$l_{Fe} = l_g - n_v b_v = 50{,}5 - 7 \cdot 1 = 43{,}5 \text{ cm}$$

adică 6 pachete de 5,5 cm și 2 pachete (de margine) de 5,25 cm.

Valoarea definitivă a inducției în întrefier

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{6{,}73 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}47} = 0{,}78 \text{ T.} \qquad B_\delta = \frac{6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}65 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}47} = 0{,}795 \text{ T.} \qquad (2.142\text{ a})$$

5. *Dimensiunile conductorului și ale crestăturii*

Deoarece numărul de conductoare în crestătură n_c diferă față de mașina cu poli aparenți, cît și pentru încadrarea în limite a inducției în jugul statorului, se vor recalcula dimensiunile conductorului astfel încît să rezulte o crestătură mai scundă și mai lată. De asemenea, mașina fiind mai bine ventilată se va alege și o densitate de curent mai mare.

Secțiunea conductorului, conform relației (1.28)

$$s_{Cu1} = \frac{I_N}{aJ_1} = \frac{40{,}32}{1 \cdot 6{,}5} = 6{,}2 \text{ mm}^2 \qquad s_{Cu1} = \frac{45{,}6}{1 \cdot 6{,}5} = 7{,}02 \text{ mm}^2 \qquad (2.143)$$

unde s-a luat

$$J_1 = 6{,}5 \text{ A/mm}^2.$$

Pe baza celor menționate cu scopul creșterii lățimii crestăturii, se alege din STAS 2873-78 (anexa 5) conductorul

CuEm 7,1 × 0,9 PE2S = 6,22 mm², *CuEm* 7,1 × 1 PE2S = 6,89 mm²,

căruia îi corespund următoarele valori recalculate ale densității de curent

$$J_1 = \frac{I_N}{as_{Cu1}} = \frac{40{,}32}{1 \cdot 6{,}22} = 6{,}48 \text{ A/mm}^2 \qquad J_1 = \frac{45{,}6}{1 \cdot 6{,}89} = 6{,}6 \text{ A/mm}^2 \qquad (2.143\text{ a})$$

valori care se consideră bune, deoarece se încadrează în limitele indicate la paragraful 1.3.1 B.

— Dimensiunile crestăturii calculate cu relațiile (1.33 a) rezultă:

— *lățimea crestăturii*

$$b_c = b_{Cu} \times \text{nr. cond. pe lățimea crestăturii} + b_{iz} = 7{,}1 \cdot 1 + 4{,}3 = 11{,}4 \text{ mm};$$

— *înălțimea crestăturii*

$$h_c = h_{Cu} \times \text{nr. cond. pe înălțimea crestăturii} + h_{iz}$$

$h_c = 0{,}9 \cdot 23 + 24{,}85 = 45{,}5$ mm | $h_c = 1 \cdot 21 + 23{,}45 = 45{,}45$ mm

unde

$$b_{iz} = 4{,}3 \text{ mm, identic ca în tabelul 2.1}$$

iar

$$h_{iz(G)} = 25{,}4 + 0{,}45 - 1 = 24{,}85 \text{ mm}$$

și

$$h_{iz(M)} = 25 + 0{,}45 - 1 = 24{,}45 \text{ mm}$$

s-au recalculat cu valorile din tabelul 2.1 la care s-a adăugat cîte o izolație a conductorului în plus (0,45 mm deoarece n_c este mai mare) și s-a scăzut izolația fund crestătură (poziția 3 de 0,5 mm) și cîte o izolație sub pană (poziția 5 de 0,5 mm).

Se stabilește, prin rotunjire, crestătura cu dimensiunile :

$$b_c = 11{,}5 \text{ mm} ; \qquad (2.144)$$

$$h_c = 45{,}5 \text{ mm}.$$

6. *Verificarea inducției în jugul și dinții statorului*

a) Inducția în jugul statorului, conform relației (1.34)

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}h'_{j1}} = \qquad B_{j1} = \frac{6{,}85 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 0{,}0545} =$$

$$= \frac{6{,}73 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 0{,}0545} = 1{,}495 \text{ T} \qquad = 1{,}52 \text{ T} \qquad (2.145)$$

unde :

$$h'_{j1} = h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_c = \frac{74 - 54}{2} - 4{,}55 = 5{,}45 \text{ cm}.$$

b) Inducția maximă aparentă în dintele statorului, conform relației (1.35)

$$B'_{d1\,max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}} = \qquad B'_{d1\,max} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}795}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} =$$

$$= \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}73 \text{ T} \qquad = 1{,}77 \text{ T} \qquad (2.145 \text{ a})$$

unde :

$$b_{d\,min} = t_1 - b_c = 23{,}5 - 11{,}5 = 12 \text{ mm} = 1{,}2 \text{ cm}.$$

2.16. DIMENSIONAREA ROTORULUI

Dimensionarea rotorului se face conform paragrafului 1.6.2 C.

1. *Dimensiunile piesei polare*

— Lățimea piesei polare, conform relației (1.65) și (2.38)

$$b_p = \alpha_p \tau = 0{,}7 \cdot 28{,}2 = 19{,}7 \text{ cm}$$

adică aceeași valoare ca la polii aparenți.

— Raza de formă a polului, se ia tot aceeași la ca polii aparenți (vezi relația (2.39))

$$R_p = 22{,}13 \text{ cm},$$

pentru $\delta_M/\delta = 2$ iar $\delta = 0{,}4$ cm.

— Înălțimea piesei polare, conform relației (1.66)

$$h_p = (0{,}1 \div 0{,}13)\tau = (0{,}1 \div 0{,}13) \cdot 28{,}2 = 2{,}82 \div 3{,}66 \text{ cm}. \qquad (2.146)$$

Se ia

$$h_p = 3{,}2 \text{ cm}.$$

— Înălțimea extremității piesei polare, conform relației (1.66 a)

$$h'_p = h_p - R_p + \sqrt{R_p^2 - (b_p/2)^2} =$$

$$= [3{,}2 - 22{,}13 + \sqrt{22{,}13^2 - (19{,}7/2)^2} = 0{,}88 \approx 0{,}9 \text{ cm}. \qquad (2.147)$$

2. *Diametrul rotorului*, conform relației (1.67)

$$D_r = (1{,}01 \div 1{,}03)[D - 2(\delta + h_p)] =$$

$$= (1{,}01 \div 1{,}03)[54 - 2 \cdot (0{,}4 + 3{,}2)] = 47{,}26 \div 48{,}2 \text{ cm}.$$

Se ia valoarea rotunjită

$$D_r = 48 \text{ cm}, \qquad (2.148)$$

urmînd ca valoarea exactă să se stabilească după construcția la scară a rotorului.

3. *Numărul de crestături ale rotorului*

Numărul de crestături ale rotorului în ipoteza că ar fi uniform repartizate pe circumferința rotorului, conform relației (1.68)

$$Z'_2 = (0{,}136 \div 0{,}162) D_r = (0{,}136 \div 0{,}162) \cdot 480 = 65{,}28 \div 77{,}76.$$

— Numărul real de crestături, conform relației (1.68 a)

$$Z_2 = \gamma Z'_2 = (0{,}5 \div 0{,}7) \cdot (65{,}28 \div 77{,}76) = 32{,}64 \div 54{,}43$$

unde

$$\gamma = 0{,}5 \div 0{,}7.$$

Din condițiile impuse de relațiile (1.69) rezultă numărul de crestături (bobinate) pe un pas polar

$$N_b = \frac{Z_2}{2p} = \frac{32{,}64 \div 54{,}43}{2 \cdot 3} = 5{,}44 \div 9.$$

Deoarece N_b trebuie să fie număr întreg par (în cazul de față 6 sau 8) se adoptă

$$N_b = 6 \qquad (2.149)$$

și rezultă

$$Z_2 = 2pN_b = 2 \cdot 3 \cdot 6 = 36 \text{ crestături reale;} \qquad (2.149\text{ a})$$

$$N_D = 5 < 6;$$

$$Z_2' = 2p(N_b + N_D) = 2 \cdot 3 \cdot (6 + 5) = 66 \text{ crestături;}$$

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z_2'} = \frac{36}{66} = 0{,}54.$$

4. *Dimensiunile (orientative) ale crestăturii rotorului*
— Lățimea crestăturii, conform relației (1.70)

$$b_{c2} = (0{,}45 \div 0{,}55) t_R = (0{,}45 \div 0{,}55) \cdot 2{,}28 = 1{,}02 \div 1{,}25 \text{ cm} \qquad (2.150)$$

unde, pasul dentar al rotorului conform relației (1.72)

$$t_R = \frac{\pi D_r}{Z_2'} = \frac{\pi \cdot 48}{66} = 2{,}28 \text{ cm.} \qquad (2.150\text{ a})$$

Lățimea crestăturii trebuie însă corelată cu lățimea standardizată a conductorului și grosimea tuturor izolațiilor b_{iz} (vezi relația (1.156)).

Conductoarele vor fi izolate tip PE2S, și așezate în crestătură pe un rînd, cu dimensiunea mare pe lățimea crestăturii.

Izolația crestăturii care este și izolația față de masă, va fi constituită din două folii NMN cu grosimea de 0,22 mm fiecare.

Rezultă deci

$$\begin{aligned} b_{iz} = {} & 0{,}45 \text{ mm} - \text{grosimea bilaterală E2S} + \\ & 0{,}88 \text{ mm} - \text{grosimea bilaterală a două folii NMN} + \\ & 0{,}25 \text{ mm} - \text{jocul pe lățime} \\ \hline & 1{,}58 \text{ mm} \approx 1{,}6 \text{ mm.} \end{aligned} \qquad (2.151)$$

Lățimea orientativă a conductorului

$$b_{cond} = b_{c2} - b_{iz} = (10{,}2 \div 12{,}5) - 1{,}6 = 8{,}6 \div 10{,}9 \text{ mm.}$$

Din STAS 2873-78 (anexa 5) se va avea în vedere a se lua (după calculul înfășurării de excitație) un conductor cu lățimea de 10 mm, pentru care rezultă

$$b_{c2} = b_{cond} + b_{iz} = 10 + 1{,}6 = 11{,}6 \text{ mm.} \qquad (2.151\text{ a})$$

— Înălțimea crestăturii, conform relației (1.71)

$$h_{c2} = (5 \div 7) b_{c2} = (5 \div 7) \cdot 11{,}6 = 58 \div 81{,}2 \text{ mm.}$$

Se ia inițial

$$h_{c2} = 65 \text{ mm} \qquad (2.151\text{ b})$$

urmînd ca valoarea definitivă să se determine după calculul înfășurării de excitație, însă astfel încît lățimea minimă a dintelui mic (la baza sa) să nu fie mai mică de 5 mm.

5. *Verificarea inducției aparente maxime la baza dintelui mare și a lățimii minime a dintelui mic.*

a) Verificarea inducției maxime se face conform relației (1.73)

$$B_{dR\max}' = \frac{\sigma \Phi}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min}} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}73 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}0883} = 1{,}95 \text{ T} > 1{,}85 \text{ T}$$

$$B_{dR\max}' = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}0883} = 1{,}99 \text{ T} > 1{,}85 \text{ T}$$

în care:

$$l_{Fe2} = l_{Fe} + 1{,}5 \text{ cm} = 43{,}5 + 1{,}5 = 45 \text{ cm;}$$

lățimea dintelui, $b_{DR\min}$ conform relației (1.128 a)

$$b_{DR\min} = \frac{\pi (D_r - 2h_{c2})}{Z_2'} (N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi \cdot (48 - 2 \cdot 6{,}5)}{66} \cdot (5 + 1) - 1{,}16 = 8{,}83 \text{ cm.} \qquad (2.152)$$

Deoarece inducția depășește limita admisibilă, se mărește l_{Fe2}. Se impune (pentru motor, care este mai solicitat)

$$B_{dR\max}' = 1{,}85 \text{ T}$$

și rezultă

$$l_{Fe2} = \frac{\sigma \Phi}{k_{Fe2} b_{DR\min} B_{dR\max}'} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}0883 \cdot 1{,}85} = 0{,}485 \text{ m} = 48{,}5 \text{ cm.} \qquad (2.152\text{ a})$$

Aceasta înseamnă că miezul magnetic al rotorului va avea 6 pachete de 5,5 cm și două pachete marginale de 7,75 cm. Cu noua lungime, inducția aparentă în dintele mare va fi

$$B'_{dR\max} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}73 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}485 \cdot 0{,}0883} = 1{,}82 \text{ T.} \qquad \left| \quad B'_{dR\max} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}85 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}485 \cdot 0{,}0883} = 1{,}85 \text{ T.} \right. \qquad (2.152\text{ b})$$

b) Verificarea lățimii minime a dintelui mic

$$b_{dR\min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z'_2} - b_{c2} = \frac{\pi \cdot (48 - 2 \cdot 6{,}5)}{66} - 1{,}16 = 5{,}06 \text{ mm.}$$

După cum se observă $b_{dR\min}$ este apropiat de limita inferioară (considerată cca 5 mm) ceea ce înseamnă că și după calculul înfășurării de excitație se va avea în vedere ca înălțimea crestăturii rotorului să nu depășească 6,5 cm.

6. *Dimensiunile jugului rotorului*

— Înălțimea jugului rotorului, conform relației (1.63)

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2k_{Fe2}l_{Fe2}B_{j2}} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}85 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}485 \cdot 1{,}52} = 0.054 \text{ m} = 5{,}4 \text{ cm} \qquad (2.153)$$

unde

$B_{j2} = 1{,}52$ T, conform paragrafului 1.3.2 B.

— Diametrul interior al rotorului, conform relației (1.64)

$$D_{ir} = D_r - 2(h_{c2} + h_{j2}) = 48 - 2 \cdot (6{,}5 + 5{,}4) = 24{,}2 \text{ cm.}$$

Se adoptă

$$D_{ir} = 24 \text{ cm.} \qquad (2.153\text{ a})$$

Se recalculează

$$h_{j2} = \frac{D_r - D_{ir}}{2} - h_{c2} = \frac{48 - 24}{2} - 6{,}5 = 5{,}5 \text{ cm.} \qquad (2.153\text{ b})$$

Valoarea recalculată a inducției în jugul rotorului

$$B_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2k_{Fe2}l_{Fe2}h_{j2}} = \frac{1{,}1 \cdot 6{,}85 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}485 \cdot 0{,}055} = 1{,}48 \text{ T.} \qquad (2.153\text{ c})$$

2.17. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE AMORTIZARE

1. Secțiunea totală a barelor pe pol, conform relației (1.74)

$$\Sigma s_a = (0{,}15 \div 0{,}3)\frac{A\tau}{J_1} = (0{,}15 \div 0{,}3) \cdot \frac{407.28{,}2}{6{,}6} = 264{,}86 \div 529{,}7 \text{ mm}^2.$$

2. *Pasul crestăturii înfășurării de amortizare* conform paragrafului 1.7 se ia astfel încît să satisfacă relația (1.75 a) atît pentru generator cît și pentru motor și să corespundă unui număr de crestături

$$n'_a = n_a + 1 = \text{număr întreg impar.}$$

Se ia

$$n'_a = 9 \text{ deci } n_a = 8$$

adică vor fi cîte 4 bare de fiecare parte a șurubului de fixare al piesei polare.

Pentru $n'_a = 9$ (care se introduce în relațiile (1.75 a) și (1.76)) rezultă

$$t_a = 1{,}97 \text{ cm}$$

ceea ce corespunde lui $k = 7$.

3. *Numărul de bare pe pol,* conform relației (1.76) (inclusiv bara care ar trebui pusă în mijlocul piesei polare, dar care nu se pune în realitate din cauza șurubului de fixare al piesei polare)

$$n'_a = \frac{b_r - t_a}{t_a} = \frac{19{,}7 - 1{,}97}{1{,}97} = 9. \qquad (2.154)$$

4. *Numărul real de bare pe pol*

$$n_a = n'_a - 1 = 9 - 1 = 8 \text{ bare.} \qquad (2.154\text{ a})$$

5. *Secțiunea unei bare de amortizare*

$$s_a = \frac{\Sigma s_a}{n_a} = \frac{264{,}86 \div 529{,}7}{8} = 33{,}1 \div 66{,}2 \text{ mm}^2.$$

6. *Diametrul barei de amortizare,* conform relației (1.77) considerînd barele rotunde

$$d_a = \sqrt{\frac{4s_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (33{,}1 \div 66{,}2)}{\pi}} = 6{,}49 \div 9{,}18 \text{ mm.}$$

Din anexa 8 atît pentru o amortizare mai bună ca generator cît și pentru o pornire corespunzătoare ca motor se ia $d_a = 9$ mm.

Ca și la polii aparenți, pentru generator barele vor fi din cupru, iar pentru motor din alamă.

Calculul caracteristicilor de pornire se face identic ca la polii aparenți, diferind, evident, parametrii înfășurărilor de excitație, calcul care nu se va mai efectua.

Construcția la scară a piesei polare și a modului de fixare pe miezul rotorului este indicată în figura 2.8 b iar vederea unui rotor în variantă combinată, în figura 2.8 a.

Cum se observă diametrul rotorului $D_r = 48$ cm. este bine stabilit, deoarece din marginea crestăturilor interioare pînă la marginea feței plane de așezare a piesei polare rezultă o distanță de cca 5 mm, cît este recomandată.

În caz că această distanță diferă de limitele recomandate (mai mică de 3 mm sau mai mare de 5 mm), atunci se schimbă diametrul D_r, pînă se încadrează în limitele de $3 \div 5$ mm, urmînd a se recalcula mărimile afectate (t_R, b_{DR} etc.).

Pentru $d_a = 9$ mm rezultă

$$s_a = \frac{\pi d_a^2}{4} = \frac{\pi \cdot 9^2}{4} = 63{,}64 \text{ mm}^2. \qquad (2.155)$$

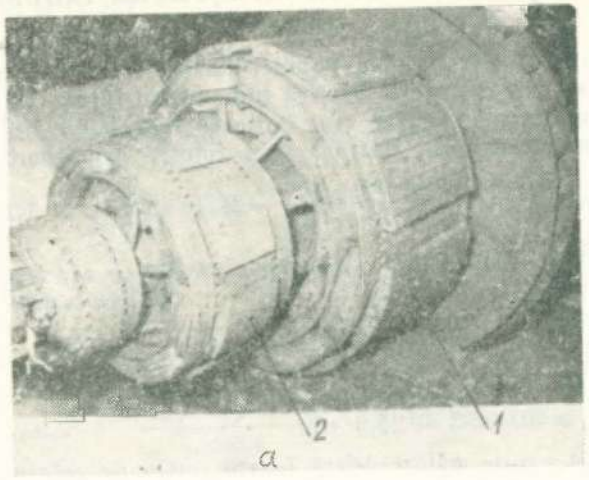
7. *Secțiunea transversală a inelului de scurtcircuitare*, conform relației (1.78)

$$s_i = (0{,}4 \div 0{,}5) s_a n_a = (0{,}4 \div 0{,}5) \cdot 63{,}64 \cdot 8 = 203{,}5 \div 254{,}4 \text{ mm}^2.$$

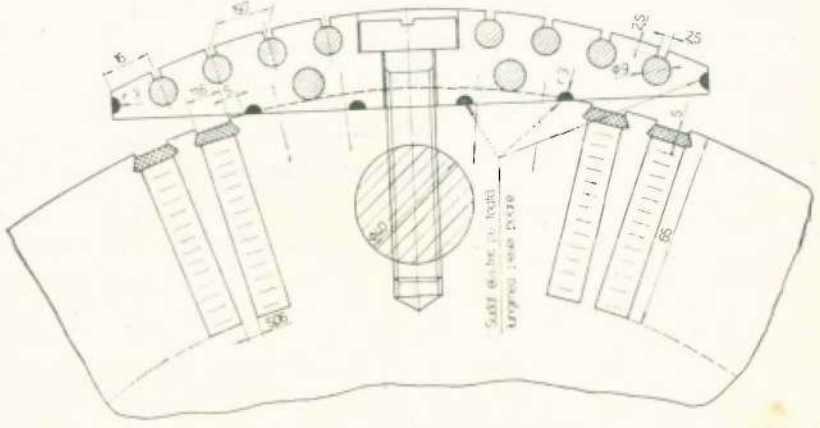
Se adoptă din anexa 5 tabelul 5-III, pentru inelul de scurtcircuitare, bară din cupru cu aceleași dimensiuni ca la polii aparenți

$$6 \times 40 = 239 \text{ mm}^2.$$

Se va adopta *inel de scurtcircuitare complet*, pentru a evita încălzirea excesivă a șuruburilor de prindere a pieselor polare de către curenții din înfășurarea de amortizare după axa transversală (în cazul inelului de scurtcircuitare incomplet acești curenți s-ar închide, de la pol la pol, prin miezul rotoric, adică prin șuruburile de fixare a pieselor polare).



a



b

Fig. 2.8 — Vederea unor rotoare în variantă combinată, pe același arbore (a) și secțiune transversală (la scară) prin rotorul în variantă combinată al mașinilor sincrone de 440 kVA/400 kW ; 6,3/6 kV ; 1 000 rot/min (b) :

1 — rotor cu piese polare ștanțate și colivie de amortizare cu inel incomplet (segmente), soluție care nu se recomandă în cazul unor condiții grele de funcționare (se va folosi inel complet) ; 2 — rotor cu piese polare masive.

2.18. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII INDUSULUI

— Lungimea frontală a bobinei statorului se determină efectuînd la scară construcția grafică indicată în figura 1.21. Valorile dimensiunilor constructive sînt indicate în tabelul 1.8.

Pentru construcția grafică s-au folosit următoarele valori:

$$t_{1med} = \frac{\pi(D + h_c)}{Z_1} = \frac{\pi \cdot (54 + 4{,}55)}{72} = 2{,}55 \text{ cm};$$

$y_1 = 10$;

$a = 4$ cm;

$r = 3{,}5$ cm;

$r_1 = 1$ cm;

$\Delta_{iz} = 0{,}5$ cm $= 5$ mm;

$y_1 l_{1med} = 10 \cdot 2{,}55 = 25{,}5$ cm.

Întrucît aceste valori diferă foarte puțin de cele obținute la mașina cu poli aparenți, se va lua aceeași lungime frontală a bobinei, dată de relația (2.50)

$$l_{f1} = l_{ABCDEF} = 2(a + l_{BC}) + \pi r_{med} = 58{,}5 \text{ cm}.$$

Lungimea medie a unei jumătăți de spiră a înfășurării statorului.

$$l_{wmed} = l_g + l_{f1} = 50{,}5 + 58{,}5 = 109 \text{ cm} = 1{,}09 \text{ m}. \qquad (2.157)$$

1. *Rezistența pe fază a înfășurării statorului se calculează* cu relația (1.79)

$$r_1 = k_r \frac{R_1 I_N}{U_{1N}} = 1 \cdot \frac{2{,}38 \cdot 40{,}32}{3\,637} = 0{,}0263 \text{ u.r.} \qquad r_1 = 1 \cdot \frac{1{,}96 \cdot 45{,}6}{3\,464} = 0{,}0258 \text{ u.r.} \qquad (2.158)$$

în care:

$k_r = 1$;

$$R_1 = \rho_{0} \frac{L_1}{s_{Cu1} a} = 1{,}38 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{602}{6{,}22 \cdot 1} = 2{,}38\ \Omega \qquad R_1 = 1{,}38 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{550}{6{,}89 \cdot 1} = 1{,}96\ \Omega \qquad (2.158\text{ a})$$

unde:

$L_1 = 2wl_{wmed} = 2 \cdot 276 \cdot 1{,}09 = 602$ m. $\qquad L_1 = 2 \cdot 252 \cdot 1{,}09 = 550$ m.

— *Permeanța specifică a scăpărilor în crestătură*, conform relației (1.86 a) și (2.53)

$$\lambda_{c1} = \frac{h_1 - h_4}{3b_c} k_\beta' + \frac{h_2'}{b_{c2}} k_\beta' + \frac{h_4}{4b_c} = \frac{36{,}2 - 5{,}6}{3 \cdot 11{,}5} \cdot 0{,}906 + \frac{7}{11{,}5} \cdot 0{,}875 + \frac{5{,}6}{4 \cdot 11{,}5} = 1{,}45.$$

$$\lambda_{c1} = \frac{35{,}6 - 5{,}6}{3 \cdot 11{,}5} \cdot 0{,}906 + \frac{7{,}5}{11{,}5} \cdot 0{,}875 + \frac{5{,}6}{4 \cdot 11{,}5} = 1{,}47. \qquad (2.159)$$

— *Permeanța specifică a scăpărilor diferențiale* se calculează conform relației (1.90)

$$\lambda_{d1} = 0{,}9 \frac{t_1 (q k_w)^2 \rho_{d1} k_{\delta 1}}{k_C \delta} \sigma_{d1} = 0{,}9 \cdot \frac{2{,}35 \cdot (4 \cdot 0{,}926)^2 \cdot 1 \cdot 0{,}953}{1{,}22 \cdot 0{,}4} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} = 0{,}339 \qquad (2.160)$$

în care:

$k_C = 1{,}22$ (vezi relația (2.169 a));

$\rho_{d1} = 1$;

$$k_{\delta 1} = 1 - 0{,}033 \frac{a_s^2}{\delta t_1} = 1 - 0{,}033 \cdot \frac{1{,}15^2}{0{,}4 \cdot 2{,}35} = 0{,}953;$$

$\sigma_{d1} = 0{,}6 \cdot 10^{-2}$ pentru $q = 4$ și $y_1 = (5/6) y_\tau$ din figura 1.24.

— *Permeanța specifică a scăpărilor prin capetele dinților*, conform relației (1.92)

$$\lambda_{z1} = \frac{5 \frac{\delta}{a_s}}{5 + 4 \frac{\delta}{a_s}} \cdot \frac{3\beta_y + 1}{4} = \frac{5 \cdot \frac{0{,}4}{1.15}}{5 + 4 \cdot \frac{0{,}4}{1{,}15}} \cdot \frac{3 \cdot 0{,}833 + 1}{4} = 0{,}238. \qquad (2.161)$$

— *Permeanța specifică a scăpărilor în părțile frontale*, conform relației (1.95)

$$\lambda_{f1} = 0{,}34 \frac{q}{l_i} (l_{f1} - 0{,}64 \beta_1 \tau) = 0{,}34 \cdot \frac{4}{47} \cdot (58{,}5 - 0{,}64 \cdot 0{,}833 \cdot 28{,}2) = 1{,}25. \qquad (2.162)$$

— *Permeanța specifică totală a înfășurării statorului*, conform relației (1.86)

$$\Sigma\lambda_1 = \lambda_{c1} + \lambda_{d1} + \lambda_{z1} + \lambda_{f1} = \quad | \quad \Sigma\lambda_1 = 1{,}47 + 0{,}339 + 0{,}23 +$$

$$= 1{,}45 + 0{,}339 + 0{,}238 + \quad | \quad + 1{,}25 = 3{,}29.$$

$$+ 1{,}25 = 3{,}27. \quad | \quad (2.163)$$

2. *Reactanța de scăpări pe fază a înfășurării statorului*, conform relației (1.84)

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} I_N}{U_{1N}} = \frac{7{,}7 \cdot 40{,}32}{3\,637} = \quad | \quad x_{\sigma 1} = \frac{6{,}46 \cdot 45{,}6}{3\,464} = 0{,}085 \text{ u.r.}$$

$$= 0{,}0853 \text{ u.r.} \quad | \quad (2.164)$$

în care conform relației (1.85)

$$X_{\sigma 1} = 0{,}158 \left(\frac{f_1}{100}\right)\left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_i}{pq} \Sigma\lambda_1 = \quad | \quad X_{\sigma 1} = 0{,}158 \cdot \left(\frac{50}{100}\right) \cdot \left(\frac{252}{100}\right)^2 \cdot$$

$$= 0{,}158 \cdot \left(\frac{50}{100}\right) \cdot \left(\frac{276}{100}\right)^2 \cdot \frac{47}{3 \cdot 4} \cdot \quad | \quad \cdot \frac{47}{3 \cdot 4} 3{,}29 = 6{,}46 \ \Omega.$$

$$\cdot 3{,}27 = 7{,}7 \ \Omega. \quad | \quad (2.164\ a)$$

3. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție longitudinală a indusului*, conform relației (1.96)

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{k' U_{m\delta_0}} = \frac{0{,}875 \cdot 9\,274}{1{,}07 \cdot 5\,612} = \quad | \quad x_{ad} = \frac{0{,}875 \cdot 9\,576}{1{,}07 \cdot 5\,781} = 1{,}354 \text{ u.r.}$$

$$= 1{,}351 \text{ u.r.} \quad | \quad (2.165)$$

în care :

conform relației (1.97)

$$F_a = 0{,}9 m \frac{w k_w}{p} I_N = \quad | \quad F_a = 0{,}9 \cdot 3 \cdot \frac{252 \cdot 0{,}926}{3} \cdot 45{,}6 =$$

$$= 0{,}9 \cdot 3 \cdot \frac{276 \cdot 0{,}926}{3} \cdot 40{,}32 = \quad | \quad = 9\,576 \text{ A} ;$$

$$= 9274 \text{ A} ; \quad | \quad (2.165\ a)$$

$$U_{m\delta_0} = 2 \frac{B_\delta}{k_L \mu_0} k_C \delta = \quad | \quad U_{m\delta_0} = 2 \cdot \frac{0{,}795}{1{,}055 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot$$

$$= 2 \cdot \frac{0{,}78}{1{,}08 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot \quad | \quad \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 5\,781 \text{ A}$$

$$\cdot 10^{-3} = 5\,612 \text{ A} \quad | \quad (2.165\ b)$$

cu k_C, dat de relația (2.169 a),

iar

$$k_{ad} = 0{,}875 ;$$

$$k' = 1{,}07$$

identici ca la polii aparenți.

4. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție transversală a indusului*, conform relației (1.99)

$$x_{aq} = \frac{k_{aq} F_a}{U_{m\delta_0}} \cdot \frac{1 + k_C}{2} = \quad | \quad x_{aq} = \frac{0{,}48 \cdot 9\,576}{5\,781} \cdot \frac{1 + 1{,}22}{2} =$$

$$= \frac{0{,}48 \cdot 9\,274}{5\,612} \cdot \frac{1 + 1{,}22}{2} = 0{,}88 \text{ u.r.} \quad | \quad = 0{,}882 \text{ u.r.} \quad (2.166)$$

unde conform relației (1.102)

$$k_{aq} = \frac{k - 1}{k} \cdot k_{aq(\text{p.a.})} + \frac{1}{k} = \frac{7{,}5 - 1}{7{,}5} \cdot 0{,}4 + \frac{1}{7{,}5} = 0{,}48$$

în care, conform relației (1.101)

$$k = \frac{\delta_{\text{transv.}}}{\delta} = \frac{3}{0{,}4} = 7{,}5$$

unde :

$$\delta_{\text{transv.}} = \frac{D - D_r}{2} = \frac{54 - 48}{2} = 3 \text{ cm.}$$

5. *Reactanța sincronă longitudinală*, conform relației (1.104)

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma 1} = 1{,}351 + \quad | \quad x_d = 1{,}354 + 0{,}085 =$$

$$+ 0{,}0853 = 1{,}436 \text{ u.r.} \quad | \quad = 1{,}439 \text{ u.r.} \quad (2.167)$$

6. *Reactanța sincronă transversală*, conform relației (1.104 a)

$$x_q = x_{aq} + x_{\sigma 1} = 0{,}88 + \quad | \quad x_q = 0{,}882 + 0{,}085 =$$

$$+ 0{,}0853 = 0{,}965 \text{ u.r.} \quad | \quad = 0{,}967 \text{ u.r.} \quad (2.168)$$

2.19. CARACTERISTICILE MAGNETICE ŞI SOLENAŢIA DE EXCITAŢIE LA SARCINĂ NOMINALĂ

2.19.1. TENSIUNILE MAGNETICE ŞI TENSIUNEA MAGNETOMOTOARE, LA T.E.M. NOMINALĂ

— *T.m. a întrefierului principal* pe o pereche de poli, conform relaţiei (1.107)

$$U_{m\delta} = 2\frac{B_\delta}{\mu_0} k_C \delta = \left| \quad U_{m\delta} = 2 \cdot \frac{0{,}795}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot \right.$$

$$= 2 \cdot \frac{0{,}78}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = \left| \quad \cdot 10^{-3} = 6\,177 \text{ A} \right. \qquad (2.169)$$

$$= 6\,061 \text{ A}$$

în care :

$$k_C = k_{C1} k_{C2} = 1{,}21 \cdot 1{,}01 = 1{,}22 \qquad (2.169\text{ a})$$

unde :

$$k_{C1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{2{,}35}{2{,}35 - 1{,}04 \cdot 0{,}4} = 1{,}21$$

cu

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_s}{\delta}} = \frac{\left(\frac{11{,}5}{4}\right)^2}{5 + \frac{11{,}5}{4}} = 1{,}04 ;$$

$$k_{C2} = \frac{t_a}{t_a - \gamma_2 \delta} = \frac{1{,}75}{1{,}75 - 0{,}069 \cdot 0{,}4} = 1{,}01$$

cu

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2{,}5}{4}\right)^2}{5 + \frac{2{,}5}{4}} = 0{,}069.$$

— *T.m. a dinţilor indusului pentru o pereche de poli*

a) Lăţimea dintelui în cele trei secţiuni, conform relaţiilor (1.110)

$$b_{d\min} = t_1 - b_{c1} = 2{,}35 - 1{,}15 = 1{,}2 \text{ cm} ;$$

$$b_{d\,med} = \frac{\pi(D + h_{c1})}{Z_1} - b_{c1} = \frac{\pi \cdot (54 + 4{,}55)}{72} - 1{,}15 = 1{,}4 \text{ cm} ; \qquad (2.170)$$

$$b_{d\,max} = \frac{\pi(D + 2h_{c1})}{Z_1} - b_{c1} = \frac{\pi \cdot (54 + 2 \cdot 4{,}55)}{72} - 1{,}15 = 1{,}6 \text{ cm}.$$

b) Inducţiile aparente în cele trei secţiuni ale dintelui, conform relaţiilor (1.110)

$$B'_{d\,max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}} = \left| \quad B'_{d\,max} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}795}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = \right.$$

$$= \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}73 \text{ T} ; \quad \left| \quad = 1{,}77 \text{ T} ; \right.$$

$$B'_{d\,med} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}} = \left| \quad B'_{d\,med} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}795}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-2}} = \right.$$

$$= \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-2}} = 1{,}48 \text{ T} ; \quad \left| \quad = 1{,}51 \text{ T} ; \right.$$

$$B'_{d\,min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,max}} = \left| \quad B'_{d\,min} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}795}{0{,}95 \cdot 0{,}453 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-2}} = \right.$$

$$= \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}47 \cdot 0{,}78}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-2}} = 1{,}3 \text{ T}. \quad \left| \quad = 1{,}32 \text{ T}. \right. \qquad (2.170\text{ a})$$

c) Întrucît toate inducţiile sînt mai mici decît 1,8 T, din anexa 2, pentru inducţiile de mai sus rezultă :

$H_{d\,max} = 95$ A/cm ; | $H_{d\,max} = 116$ A/cm ;

$H_{d\,med} = 18$ A/cm ; | $H_{d\,med} = 21$ A/cm ; (2.170 b)

$H_{d\,min} = 7$ A/cm. | $H_{d\,min} = 7{,}5$ A/cm.

Valoarea medie a intensităţii cîmpului magnetic, conform relaţiei (1.111)

$$H_{d_1} = 1/6 \cdot (H_{d\,max} + \left| \quad H_{d1} = 1/6 \cdot (116 + 4 \cdot 21 + \right.$$

$$+ 4H_{d\,med} + H_{d\,min}) = \left| \quad + 7{,}5) = 34{,}6 \text{ A/cm}. \right.$$

$$= 1/6 \cdot (95 + 4 \cdot 18 +$$

$$+ 7) = 29 \text{ A/cm}. \qquad (2.170\text{ c})$$

T.m. a dinților conform relației (1.109) este

$$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1} = \quad | \quad U_{md1} = 2\cdot 4{,}55\cdot 34{,}6 = 315 \text{ A.}$$
$$= 2\cdot 4{,}55\cdot 29 = 264 \text{ A.} \qquad (2.171)$$

T.m. a jugului statorului pentru o pereche de poli

a) Lungimea medie a liniei de cîmp

$$L_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi(74 - 5{,}45)}{2\cdot 3} = 35{,}8 \text{ cm.} \qquad (2.172)$$

b) Din anexa 2, avînd în vedere valorile inducțiilor în jug (vezi relația (2.145)) pentru

$$B_{j1} = 1{,}495 \text{ T} \quad | \quad B_{j1} = 1{,}52 \text{ T}$$

rezultă

$$H_{j1} = 19{,}5 \text{ A/cm.} \quad | \quad H_{j1} = 21{,}5 \text{ A/cm}$$

T.m. a jugului statorului, conform relației (1.113) este

$$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1} = 0{,}39\cdot 35{,}8\cdot \quad | \quad U_{mj1} = 0{,}375\cdot 35{,}8\cdot 21{,}5 =$$
$$\cdot 19{,}5 = 272 \text{ A} \quad | \quad = 288 \text{ A} \qquad (2.172 \text{ a})$$

unde din figura 1.31

$$\zeta_1 = 0{,}39. \quad | \quad \zeta_{z1} = 0{,}375.$$

T.m. a rotorului pentru o pereche de poli

— *T.m. a întrefierului de îmbinare* dintre piesa polară și dintele mare, pentru o pereche de poli, conform relației (1.130)

$$U_{m\delta\, imb} = 2\frac{B_{dR\,min}}{\mu_0}\delta_{imb} = \quad | \quad U_{m\delta\, imb} = 2\cdot \frac{1.21}{4\pi\cdot 10^{-7}}\cdot 0{,}015\cdot$$
$$= 2\cdot \frac{1{,}19}{4\pi\cdot 10^{-7}}\cdot 0{,}015\cdot 10^{-2} = \quad | \quad \cdot 10^{-2} = 289 \text{ A}$$
$$= 284 \text{ A} \qquad (2.173)$$

în care, conform relației (1.128)

$$B_{dR\,min} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\,max}} = \quad | \quad B_{dR\,min} = \frac{6{,}85\cdot 10^{-2} + 0{,}145\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}485\cdot 0{,}125} =$$
$$= \frac{6{,}73\cdot 10^{-2} + 0{,}141\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}485\cdot 0{,}125} = \quad | \quad = 1{,}21 \text{ T}$$
$$= 1{,}19 \text{ T} \qquad (2.173 \text{ a})$$

unde, conform relației (1.126)

$$\Phi_{\sigma p} = \lambda_{\sigma p}U_{m\delta dj1} = \quad | \quad \Phi_{\sigma p} = 2{,}14\cdot 10^{-7}\cdot 6\,780 =$$
$$= 2{,}14\cdot 10^{-7}\cdot 6\,597 = \quad | \quad = 0{,}145\cdot 10^{-2} \text{ Wb;}$$
$$= 0{,}141\cdot 10^{-2} \text{ Wb;} \qquad (2.173 \text{ b})$$

conform relației (1.127)

$$\lambda_{\sigma p} = 2\mu_0 l_p\left[\frac{h'_p}{c_p} + \frac{2h_{pm}}{\pi l_p}\ln\left(1 + \frac{\pi}{2}\frac{b_p}{c_p}\right)\right] =$$
$$= 2\cdot 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 0{,}485\cdot\left[\frac{0{,}9}{7{,}3} + \frac{2\cdot 2{,}43}{\pi\cdot 48{,}5}\cdot\ln\left(1 + \frac{\pi}{2}\cdot\frac{19{,}7}{7{,}3}\right)\right] =$$
$$= 2{,}14\cdot 10^{-7} \qquad (2.173 \text{ c})$$

cu:

$$h_{pm} = \frac{2h_p + h'_p}{3} = \frac{2\cdot 3{,}2 + 0{,}9}{3} 2{,}43 \text{ cm;}$$

$$c_p = \frac{\pi\sqrt{[D - (2\delta + 2h_p) + h'_p]^2 + b_p^2}}{2p} - b_p =$$

$$= \frac{\pi\cdot\sqrt{[54 - (2\cdot 0{,}4 + 2\cdot 3{,}2) + 0{,}9]^2 + 19{,}7^2}}{2\cdot 3} - 19{,}7 = 7{,}3 \text{ cm;}$$

$$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + \quad | \quad U_{m\delta dj1} = 6\,177 + 315 +$$
$$+ U_{mj1} = 6\,061 + 264 + \quad | \quad + 288 = 6\,780 \text{ A;}$$
$$+ 272 = 6\,597 \text{ A;} \qquad (2.174)$$

$$b_{DR\,max} = \frac{\pi D_r}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi\cdot 0{,}48}{66}\cdot(5 + 1) - 0{,}0116 =$$
$$= 0{,}125 \text{ m.}$$

Tensiunea magnetică a dintelui mare al rotorului

a) Fluxurile în cele trei secțiuni :

$$\Phi_{max} = \Phi + \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} = 6{,}73\cdot10^{-2} + 0{,}43\cdot10^{-2} + 0{,}141\cdot10^{-2} = 7{,}30\cdot10^{-2}\ \text{Wb};$$

$$\Phi_{max} = 6{,}85\cdot10^{-2} + 0{,}44\cdot10^{-2} + 0{,}145\cdot10^{-2} = 7{,}43\cdot10^{-2}\ \text{Wb};$$

$$\Phi_{med} = \Phi + \frac{1}{2}\Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} = 6{,}73\cdot10^{-2} + \frac{1}{2}\cdot0{,}43\cdot10^{-2} + 0{,}141\cdot10^{-2} = 7{,}08\cdot10^{-2}\ \text{Wb};$$

$$\Phi_{med} = 6{,}85\cdot10^{-2} + \frac{1}{2}\cdot0{,}44\cdot10^{-2} + 0{,}145\cdot10^{-2} = 7{,}21\cdot10^{-2}\ \text{Wb};$$

(2.175)

$$\Phi_{min} = \Phi + \Phi_{\sigma p} = 6{,}73\cdot10^{-2} + 0{,}141\cdot10^{2} = 6{,}87\cdot10^{-2}\ \text{Wb}$$

$$\Phi_{min} = 6{,}85\cdot10^{-2} + 0{,}145\cdot10^{-2} = 6{,}99\cdot10^{-2}\ \text{Wb}$$

în care, conform relației (1.124)

$$\Phi_{\sigma c} = \lambda_{\sigma c} U_{m\delta dj1\delta\,imb} = 6{,}36\cdot10^{-7}\cdot6\,881 = 0{,}43\cdot10^{-2}\ \text{Wb}$$

$$\Phi_{\sigma c} = 6{,}36\cdot10^{-7}\cdot7\,069 = 0{,}44\cdot10^{-2}\ \text{Wb}$$

(2.175 a)

unde, conform relației (1.125)

$$\lambda_{\sigma c} = 2\mu_0\frac{l_{Fe2}}{N_b}\lambda_{ce} + 0{,}2\mu_0 t_R = 2\cdot4\cdot\pi\cdot10^{-7}\cdot\frac{0{,}485}{6}\cdot3{,}1 + 0{,}2\cdot4\cdot\pi\cdot10^{-7}\cdot0{,}0228 = 6{,}36\cdot10^{-7} \qquad (2.175\ b)$$

conform relației (1.118 a) și crestăturii din figura 2.8 b

$$\lambda_{ce} = \frac{h_2}{2b_{c2}} + \frac{h_{02}}{b_{c2}} = \frac{58}{2\cdot11{,}6} + \frac{7}{11{,}6} = 3{,}1$$

cu $h_{02} = 1$ mm (istmul crestăturii) + 1 mm (izolațiile sub pană) + + 5 mm (pana crestăturii) = 7 mm.

Este necesar a se lua pana cu grosimea de 5 mm (și uneori chiar 6 mm) deoarece crestăturile sînt foarte înalte și deci solicitările mecanice (la forța centrifugă) sînt mari. În orice caz pana

trebuie verificată din punct de vedere mecanic conform cap. 6 din vol. I ;

$$U_{m\delta dj1\delta mb} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} + U_{m\delta imb} = 6\,061 + 264 + 272 + 284 = 6\,881\ \text{A}.$$

$$U_{m\delta dj1\delta imb} = 6\,177 + 315 + 288 + 289 = 7\,069\ \text{A}.$$

(2.175 c)

b) Lățimile corespunzătoare ale dintelui mare, conform relațiilor (1.128 a) :

$$b_{DR\,min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi\cdot(48 - 2\cdot6{,}5)}{66}\cdot(5 + 1) - 1{,}16 = 8{,}83\ \text{cm};$$

$$b_{DR\,med} = \frac{\pi(D_r - h_{c2})}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi\cdot(48 - 6{,}5}{66}\cdot(5 + 1) - 1{,}16 = 10{,}68\ \text{cm};$$

(2.176)

$$b_{DR\,max} = \frac{\pi D_r}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi\cdot48}{66}\cdot(5 + 1) - 1{,}16 = 12{,}5\ \text{cm}.$$

c) Inducțiile în cele trei secțiuni ale dintelui mare conform relațiilor (1.128) :

$$B'_{dR\,max} = \frac{\Phi_{max}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\,min}} = \frac{7{,}3\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}0883} = 1{,}79\ \text{T};$$

$$B'_{dR\,max} = \frac{7{,}43\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}0883} = 1{,}82\ \text{T};$$

$$B'_{dR\,med} = \frac{\Phi_{med}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\,med}} = \frac{7{,}08\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}1068} = 1{,}43\ \text{T};$$

$$B'_{dR\,med} = \frac{7{,}21\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}1068} = 1{,}46\ \text{T};$$

$$B'_{dR\,min} = \frac{\Phi_{min}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\,max}} = \frac{6{,}87\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}125} = 1{,}19\ \text{T}.$$

$$B'_{dR\,min} = \frac{6{,}99\cdot10^{-2}}{0{,}95\cdot0{,}485\cdot0{,}125} = 1{,}21\ \text{T}.$$

(2.177)

d) Corespunzător inducțiilor de mai sus rezultă intensitățile cîmpurilor magnetice din anexa 2, deoarece miezul magnetic al rotorului (exceptînd piesa polară care se împachetează din tole de tablă obișnuită de 1÷3 mm grosime) se face din același material ca miezul statorului (din interiorul tolelor stator):

$H_{dRmax} = 118$ A/cm ; | $H_{dRmax} = 125$ A/cm ;

$H_{dRmed} = 12{,}5$ A/cm ; | $H_{dRmed} = 16$ A/cm ;

$H_{dRmin} = 5$ A/cm. | $H_{dRmin} = 5{,}2$ A/cm.

Intensitatea medie a cîmpului magnetic în dintele mare, conform relației (1.123 a)

$$H_{dR} = \frac{1}{6}(H_{dRmax} + 4H_{dRmed} + H_{dRmin}) = \frac{1}{6}\cdot(118 + 4\cdot 12{,}5 + 5) = 28{,}8 \text{ A/cm.}$$

$$H_{dR} = \frac{1}{6}\cdot(125 + 4\cdot 16 + 5{,}2) = 32{,}36 \text{ A/cm.}$$

T.m. a dintelui mare al rotorului conform relației (1.123)

$U_{mdR} = 2h_{c2}H_{dR} = 2\cdot 6{,}5\cdot 28{,}8 = 374$ A. | $U_{mdR} = 2\cdot 6{,}5\cdot 32{,}36 = 420$ A. (2.178)

— *Tensiunea magnetică a jugului rotorului* (inductorului) pentru o pereche de poli.

a) Lungimea medie a liniei de cîmp în jugul rotorului conform relației (1.134)

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_{ir} + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi\cdot(24 + 5{,}5)}{2\cdot 3} = 15{,}43 \text{ cm.} \quad (2.179)$$

b) Inducția magnetică în jugul rotorului (valoarea exactă) conform relației (1.132)

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2k_{Fe2}l_{j2}h_{j2}} = \frac{6{,}73\cdot 10^{-2} + 0{,}57\cdot 10^{-2}}{2\cdot 0{,}95\cdot 0{,}485\cdot 0{,}055} = 1{,}44 \text{ T}$$

$$B_{j2} = \frac{6{,}85\cdot 10^{-2} + 0{,}58\cdot 10^{-2}}{2\cdot 0{,}95\cdot 0{,}485\cdot 0{,}055} = 1{,}46 \text{ T} \quad (2.179 \text{ a})$$

în care :

$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p} = 0{,}43\cdot 10^{-2} + 0{,}141\cdot 10^{-2} = 0{,}57\cdot 10^{-2}$ Wb. | $\Phi_\sigma = 0{,}44\cdot 10^{-2} + 0{,}145\cdot 10^{-2} = 0{,}58\cdot 10^{-2}$ Wb. (2.179 b)

Pentru valorile inducțiilor de mai sus, din anexa 2 rezultă

$H_{j2} = 15$ A/cm. | $H_{j2} = 16$ A/cm.

c) T.m. a jugului rotor, conform relației (1.131)

$U_{mj2} = L_{j2}H_{j2} = 15{,}43\cdot 15 = 231$ A. | $U_{mj2} = 15{,}43\cdot 16 = 246$ A. (2.180)

T.m. a rotorului

$U_{mR} = U_{mdR} + U_{m\delta imb} + U_{mj2} = 374 + 284 + 231 = 889$ A. | $U_{mR} = 420 + 289 + 246 = 955$ A. (2.181)

T.m.m. pentru t.e.m. nominală

$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta dj1} + U_{mR} = 6\,597 + 889 = 4\,786$ A. | $\Sigma U_{mi} = 6\,780 + 955 = 7\,735$ A. (2.182)

2.19.2. CONSTRUCȚIA CARACTERISTICILOR MAGNETICE ȘI DETERMINAREA SOLENAȚIEI DE EXCITAȚIE NOMINALĂ

A. **Caracteristicile magnetice**

Caracteristicile magnetice sînt aceleași ca la mașina cu poli aparenți (vezi paragraful 1.9.2 A).

Acestea sînt reprezentate pe baza tabelului 2.5, în figura 2.9 a, pentru generator și în figura 2.9 b, pentru motor.

B. **Solenația de excitație la sarcină nominală**

Se determină ca și la mașina cu poli aparenți, prin metoda caracteristicilor magnetice parțiale, de la paragraful 1.9.2 B punctul 1 și paragraful 2.8.2 B, folosind caracteristicile magnetice din figura 2.9 a și b.

Astfel, raportul de saturație, conform relației (1.138) este

$\frac{U'_{m\delta dj1}}{U'_{m\delta}} = \frac{1{,}025}{0{,}9625} = 1{,}06$ | $\frac{U'_{m\delta dj1}}{U'_{m\delta}} = \frac{0{,}93}{0{,}87} = 1{,}06$ (2.183)

TABELUL 2.5

Relația / 1	u.r.	0,55	0,85	1($\underset{\sim}{U}_{1NM}$)	($\underset{\sim}{U}_{1NG}$)	$k_E(\underset{\sim}{E}_{NM})$	1,23	1,3
	V	1 905,2	2 944,4	3 464	3 637	3 654	4 260,7	4 503,2
	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi = \frac{E}{4k_B f_1 w k_w}$	Wb	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$5,52 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$6,23 \cdot 10^{-2}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$	$7,98 \cdot 10^{-2}$	$8,44 \cdot 10^{-2}$
$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i}$	T	0,414	0,64	0,754	0,723	0,795	0,926	0,979
$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_C \delta$	A	3 217	4 973	5 859	5 618	6 177	7 195	7 607
$B'_{d\ max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ min}}$	T	0,92	1,42	1,67	1,61	1,77	2,06	2,18
$B'_{d\ med} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ med}}$	T	0,79	1,22	1,43	1,38	1,51	1,76	1,86
$B'_{d\ min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ max}}$	T	0,69	1,06	1,25	1,2	1,32	1,54	1,63
$k_{d1} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ max}} = 0,81$; $k_{d2} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ med}} = 0,93$; $k_{d3} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\ min}} = 1,08$								
$H_{d\,max}$	A/cm	2,1	11	63	38	118	400	750
$H_{d\,med}$	A/cm	1,55	5,2	12,5	10	21	105	150
$H_{d\,min}$	A/cm	1,25	3,2	4,5	3,5	7,5	25	55

TABELUL 2.5 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{d\ max} + 4H_{d\ med} + H_{d\ min})$	A/cm	1,59	5,83	19,58	13,38	34,6	140,8	234
$U_{md1} = 2h_{c1} H_{d1}$	A	14	53	178	122	315	1 281	2 129
$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe} l_{Fe} h_{j1}}$	T	0,79	1,22	1,44	1,38	1,52	1,77	1,87
H_{j1}	A/cm	1,55	5,2	15	9,5	21,5	106	200
$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1}$ (ζ_1)	A	29(0,52)	84(0,45)	209(0,39)	139(0,41)	288(0,375)	910(0,24)	1 646 (0,23)
$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1}$	A	3 260	5 110	6 246	5 879	6 780	9 386	11 392
$\Phi_{\sigma p} = \lambda_{\sigma p} U_{m\delta dj1}$	Wb	$0,069 \cdot 10^{-2}$	$0,108 \cdot 10^{-2}$	$0,132 \cdot 10^{-2}$	$0,124 \cdot 10^{-2}$	$0,14 \cdot 10^{-2}$	$0,19 \cdot 10^{-2}$	$0,24 \cdot 10^{-2}$
$B_{dR\ min} = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dR\ max}}$	T	0,73	0,97	1,15	1,10	1,21	1,41	1,5
$U_{m\delta\ imb} = \frac{2}{\mu_0} B_{dR\ min} \delta_{imb}$	A	174	231	274	262	289	336	358
$U_{m\delta dj1\delta imb} = U_{m\delta dj1} + U_{m\delta\ imb}$	A	3 434	5 341	6 520	6 141	7 069	9 722	11 740
$\Phi_{\sigma c} = \lambda_{\sigma c} U_{m\delta dj1\delta imb}$	Wb	$0,21 \cdot 10^{-2}$	$0,33 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$0,38 \cdot 10^{-2}$	$0,44 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$	$0,73 \cdot 10^{-2}$
$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma p} + \Phi_{\sigma c}\left(\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi}\right)$	Wb	$3,84 \cdot 10^{-2}$ (1,078)	$5,95 \cdot 10^{-2}$ (1,079)	$7,03 \cdot 10^{-2}$ (1,081)	$6,73 \cdot 10^{-2}$ (1,08)	$7,43 \cdot 10^{-2}$ (1,084)	$8,77 \cdot 10^{-2}$ (1,089)	$9,41 \cdot 10^{-2}$ (1,1)
$\Phi_\sigma = \Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}$	Wb	$0,27 \cdot 10^{-2}$	$0,43 \cdot 10^{-2}$	$0,53 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,58 \cdot 10^{-2}$	$0,79 \cdot 10^{-2}$	$0,97 \cdot 10^{-2}$

TABELUL 2.5 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$B_{dR\,med} = \dfrac{\Phi + \frac{1}{2}\Phi_{\sigma c} + \Phi_{\sigma p}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dR\,med}}$	T	0,76	1,17	1,38	1,32	1,46	1,72	1,83
$B_{dR\,max} = \dfrac{\Phi_m}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dR\,min}}$	T	0,94	1,46	1,72	1,65	1,82	2,15	2,3
$k_{dR\,max} = \dfrac{\left(\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p} - N_D\right) b_{c2} l_i}{k_{Fe2}\left[\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p}(t_{R\,min} - b_{c2}) + N_D b_{c2}\right] l_{Fe2}} = 0{,}35$; $k_{dR\,med} = \dfrac{\left(\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p} - N_D\right) b_{c2} l_i}{k_{Fe2}\left[\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p}(t_{R\,med} - b_{c2}) + N_D b_{c2}\right] l_{Fe2}} = 0{,}29$; $k_{dR\,min} = \dfrac{\left(\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p} - N_D\right) b_{c2} l_i}{k_{Fe2}\left[\alpha_p \dfrac{Z_2'}{2p}(t_{Rmax} - b_{c2}) + N_D b_{c2}\right] l_{Fe2}} = 0{,}23$								
$H_{dR\,min}$	A/cm	1,3	2,8	4,1	3,7	5,2	10,5	20
$H_{dR\,med}$	A/cm	1,15	4,3	9	7,4	16	90	150
$H_{dR\,max}$	A/cm	2,2	16	90	60	125	1 000	2 000
$H_{dR} = \dfrac{1}{6}(H_{dR\,max} + 4H_{dR\,med} + H_{dR\,min})$	A/cm	1,5	6	21,68	15,55	32,36	228	436
$U_{mdR} = 2h_{c2}H_{dR}$	A	19,5	78	281	202	420	2 964	5 668

TABELUL 2.5 (continuare)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$B_{j2} = \dfrac{\Phi_m}{2k_{Fe2} l_{j2} h_{j2}}$	T	0,75	1,17	1,38	1,32	1,46	1,73	1,8
	H_{j2}	A/cm	1,25	4,3	9,5	7,2	16	95	120
	$U_{mj2} = L_{j2} H_{j2}$	A	19	66	146	111	246	1 465	1 851
	$U_{mR} = U_{mdR} + U_{m\delta imb} + U_{mj2}$	A	212	375	701	575	955	4 765	7 877
	$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta dj1} + U_{mR}$	A	3 472	5 485	6 847	6 454	7 735	14 151	19 259
MOTOR	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,54	0,84	1	—	1,055	1,22	1,29
MOTOR	$\underset{\sim}{\Phi_m} = \Phi_m/\Phi_{0N}$	u.r.	0,59	0,91	1,08	—	1,14	1,34	1,44
MOTOR	$\underset{\sim}{\Phi_\sigma} = \Phi_\sigma/\Phi_{0N}$	u.r.	0,041	0,066	0,081	—	0,089	0,121	0,149
MOTOR	$\underset{\sim}{\Sigma U_{mi}} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,5	0,8	1	—	1,12	2	2,8
MOTOR	$\underset{\sim}{U_{m\delta dj1}} = U_{m\delta dj1}/U_{m0N}$	u.r.	0,47	0,74	0,91	—	0,99	1,37	1,66
MOTOR	$\underset{\sim}{U_{mR}} = U_{mR}/U_{m0N}$	u.r.	0,030	0,054	0,087	—	0,139	0,69	1,15
GENERATOR	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,57	0,88	—	1	1,09	1,28	1,35
GENERATOR	$\underset{\sim}{\Phi_m} = \Phi_m/\Phi_{0N}$	u.r.	0,61	0,95	—	1,08	1,19	1,4	1,5
GENERATOR	$\underset{\sim}{\Phi_\sigma} = \Phi_\sigma/\Phi_{0N}$	u.r.	0,043	0,069	—	0,080	0,093	0,126	0,15
GENERATOR	$\underset{\sim}{\Sigma U_{mi}} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,53	0,84	—	1	1,19	2,19	2,98
GENERATOR	$\underset{\sim}{U_{m\delta dj1}} = U_{m\delta dj1}/U_{m0N}$	u.r.	0,5	0,79	—	0,91	1,05	1,45	1,76
GENERATOR	$\underset{\sim}{U_{mR}} = U_{mR}/U_{m0N}$	u.r.	0,032	0,058	—	0,089	0,147	0,73	1,22

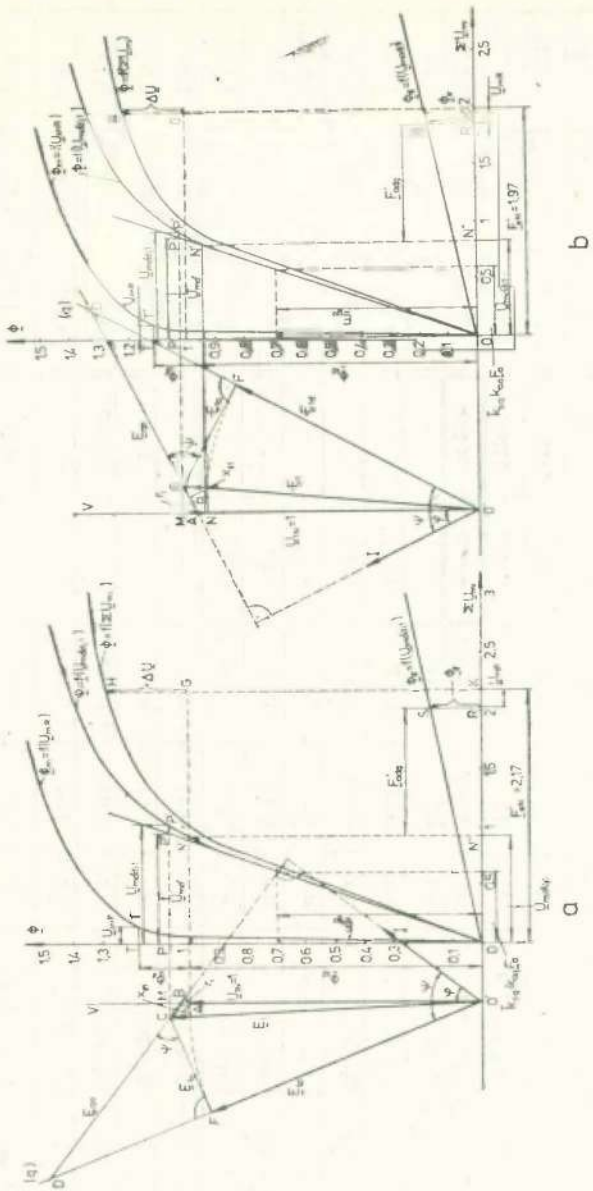


Fig. 2.9 — Caracteristicile magnetice și determinarea solenației de excitație la sarcină nominală pentru mașinile sincrone cu rotorul în variantă combinată :
a — generator de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min ; b — motor de 400 kW ; 6 kV ; 1 000 rot/min.

pentru care din figura 1.37 b rezultă (valorile cu $\sim$) :

$$\tilde{k}_{sd} = 0{,}978\,;$$
$$\tilde{k}_{sq} = 0{,}9\,; \qquad (2.183\ a)$$
$$\tilde{k}_{1} = 0{,}00105.$$

Solenația de reacție a indusului, în u.r, conform relației (1.139 a) este

$$\underset{\sim}{F}_a = \frac{F_a}{U_{m0N}} = \frac{9\,274}{6\,454} = 1{,}43 \text{ u.r.} \quad \Big| \quad \underset{\sim}{F}_a = \frac{9\,576}{6\,847} = 1{,}39 \text{ u.r.} \qquad (2.184)$$

unde din tabelul 2.5, pentru U_{1NG} și U_{1NM} rezultă :

$U_{m0N} = 6\,454$ A. | $U_{m0N} = 6\,847$ A.

Solenația transversală, cu influența saturației magnetice, conform relației (1.139)

$$\tilde{k}_{sq}\,k_{aq}\underset{\sim}{F}_a = 0{,}9\cdot 0{,}48\cdot 1{,}43 = 0{,}61 \text{ u.r.} \quad \Big| \quad \tilde{k}_{sq}k_{aq}\underset{\sim}{F}_a = 0{,}9\cdot 0{,}48\cdot 1{,}39 = 0{,}6 \text{ u.r.} \qquad (2.185)$$

pentru care din figura 2.9 a (pentru generator) și figura 2.9 b (pentru motor) rezultă

$\underset{\sim}{E}_{q0} = 0{,}7$ u.r. | $\underset{\sim}{E}_{q0} = 0{,}69$ u.r.

După determinarea direcției axei transversale (q) rezultă

(fig. 2.9 a) | (fig. 2.9 b)
$\psi = 59°$. | $\psi = 53°$.

Solenația „eficientă" de reacție a indusului care ține cont de efectul demagnetizant al componentelor longitudinală și transversală, conform relației (1.137)

$$\underset{\sim}{F}'_{adq} = \tilde{k}_{sd}k_{ad}F_a \sin\psi + \tilde{k}_1\frac{\tau}{\delta}\underset{\sim}{F}_a\cos\psi = 0{,}978\cdot 0{,}875\cdot 1{,}43\cdot\sin 59° + 0{,}00105\cdot\frac{28{,}2}{0{,}4}\cdot 1{,}43\cdot\cos 59° = 1{,}1 \text{ u.r.}$$

$$\underset{\sim}{F}'_{adq} = 0{,}978\cdot 0{,}875\cdot 1{,}39\cdot\sin 53° + 0{,}00105\cdot\frac{28{,}2}{0{,}4}\cdot 1{,}39\cdot\cos 53° = 1{,}01 \text{ u.r.} \qquad (2.186)$$

Din construcția grafică rezultă solenația de excitație la sarcină nominală, în u.r.

(fig. 2.9 a)

$$\overline{OK} = \underset{\sim}{F}'_{eN} = 2{,}17 \text{ u.r.}$$

(fig. 2.9 b)

$$\overline{OK} = \underset{\sim}{F}'_{eN} = 1{,}97 \text{ u.r.}$$

După majorarea cu $4 \div 6\%$ rezultă, conform relației (1.145 a)

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06)\underset{\sim}{F}'_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06) \cdot 2{,}17 = (2{,}25 \div 2{,}3) \text{ u.r.}$$

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = (1{,}04 \div 1{,}06) \cdot 1{,}97 = (2{,}04 \div 2{,}08) \text{ u.r.} \qquad (2.187\ a)$$

Solenația de excitație la sarcină nominală, în A, conform relației (1.145 b) este

$$F_{eN} = \underset{\sim}{F}_{eN} U_{m0N} = (2{,}25 \div 2{,}3) \cdot 6\,454 = 14\,521 \div 14\,844 \text{ A.}$$

$$F_{eN} = (2{,}04 \div 2{,}08) \cdot 6\,847 = 13\,967 \div 14\,241 \text{ A.} \qquad (2.187\ b)$$

Se ia, pentru ambele regimuri

$$F_{eN} = 14\,500 \text{ A.} \qquad (2.188)$$

Căderea de tensiune în procente, conform relației (1.146)

$$\Delta U = \frac{\overline{KH} - \overline{KG}}{\overline{KG}} \cdot 100 = \frac{1{,}29 - 1}{1} \cdot 100 = 29\%$$

$$\Delta U = \frac{1{,}22 - 1}{1} \cdot 100 = 22\% \qquad (2.189)$$

care se încadrează în limitele impuse de STAS 1893-78.

2.20. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

— Secțiunea conductorului înfășurării de excitație, considerînd că toate bobinele sînt în serie, conform relației (1.153)

$$s_{ce} = 1{,}1 \rho_\vartheta \frac{p F_{eN} l_{e\,med}}{U_e} = 1{,}1 \cdot 0{,}0265 \cdot \frac{3 \cdot 14\,500 \cdot 1{,}6}{75} = 27 \text{ mm}^2 \qquad (2.190)$$

unde

$U_e = 75$ V stabilită conform relației (1.152).

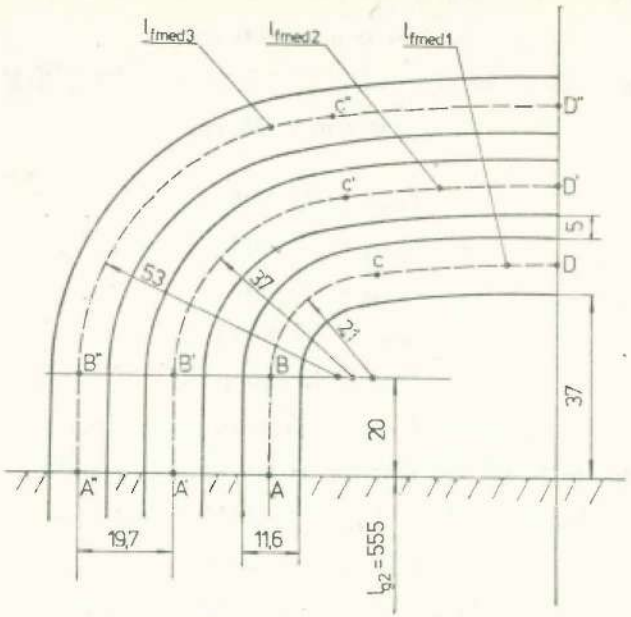


Fig. 2.10 — Capetele frontale ale înfășurării de excitație, la rotorul în variantă combinată (la scară).

Lungimea medie a spirei se determină făcînd construcția la scară a capetelor frontale așa cum se indică în figura 1.42 b. Construcția la scară este indicată în figura 2.10, în care s-au folosit următoarele valori pentru elementele constructive:

$$\left.\begin{aligned} l_{R\,med} &= \frac{\pi(D_r - h_{r2})}{Z'_z} = \frac{\pi(48 - 6{,}5)}{66} = 1{,}97 \text{ cm;} \\ a &= 2 \text{ cm;} \\ R &= 1{,}5 \text{ cm;} \\ \Delta_{iz} &= 0{,}5 \text{ cm;} \\ C_1 &= a + R + 0{,}2 = 2 + 1{,}5 + 0{,}2 = 3{,}7 \text{ cm;} \\ R_1 &= 23 \text{ cm.} \end{aligned}\right\} \qquad (2.191)$$

Din desenul la scară au rezultat:

$$l_{fmed1} = 2a + \pi r_{med1} + 2l_{CD} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 21 + 2 \cdot 37{,}5 = 181 \text{ mm} = 18{,}1 \text{ cm;}$$

$$l_{fmed2} = 2a + \pi r_{med2} + 2l_{C'D'} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 37 + 2 \cdot 45 =$$
$$= 246 \text{ mm} = 24{,}6 \text{ cm};$$
$$l_{fmed3} = 2a + \pi r_{med3} + 2l_{C''D''} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 53 + 2 \cdot 47 =$$
$$= 300 \text{ mm} = 30 \text{ cm} \qquad (2.192)$$

unde :

$$r_{med1} = 21 \text{ mm};$$
$$r_{med2} = 37 \text{ mm};$$
$$r_{med3} = 53 \text{ mm};$$
$$l_{CD} = 37{,}5 \text{ mm};$$
$$l_{C'D'} = 45 \text{ mm};$$
$$l_{C''D''} = 47 \text{ mm}.$$

Lungimile medii ale spirelor bobinelor de excitație :

$$l_{emed1} = 2(l_{g2} + l_{fmed1}) = 2 \cdot (55{,}5 + 18{,}1) =$$
$$= 147 \text{ cm} = 1{,}47 \text{ m};$$
$$l_{emed2} = 2(l_{g2} + l_{fmed2}) = 2 \cdot (55{,}5 + 24{,}6) =$$
$$= 160 \text{ cm} = 1{,}6 \text{ m}; \qquad (2.192 \text{ a})$$
$$l_{emed3} = 2(l_{g2} + l_{fmed3}) = 2 \cdot (55{,}5 + 30) = 171 \text{ cm} =$$
$$= 1{,}71 \text{ m}$$

unde lungimea geometrică a rotorului este

$$l_{g2} = l_{Fe2} + n_v b_v = 48{,}5 + 7 \cdot 1 = 55{,}5 \text{ cm}.$$

Lungimea medie rezultantă va fi

$$l_{emed} = \frac{l_{emed1} + l_{emed2} + l_{emed3}}{N_b/2} = \frac{1{,}47 + 1{,}6 + 1{,}71}{6/2} = 1{,}6 \text{ m}. \qquad (2.193)$$

Din STAS 2873-78 anexa 5, ținînd cont și de indicațiile de la paragraful 2.16 punctul 4 (vezi relația (2.151 a)) în care s-a considerat lățimea conductorului înfășurării de excitație $b_{cond} = 10$ mm, se ia conductorul

$$CuEm \ 10 \times 2{,}65 \ \text{PE2S} = 26 \text{ mm}^2.$$

Nu s-a luat conductorul $CuEm$ $10 \times 2{,}8$ PE2S $= 27{,}5$ mm^2 deoarece secțiunea s-a calculat acoperitor cu factorul 1,1 urmărindu-se de asemenea și obținerea unei înălțimi a crestăturii cît mai mică, deoarece lățimea minimă a dintelui mic este la limita inferioară — vezi paragraful 2.16 punctul 6.

— Curentul de excitație conform relației (1.155)

$$I_e = s_{ce} J_e = 26 \cdot 5{,}25 = 136{,}5 \text{ A} \qquad (2.194)$$

în care conform paragrafului 1.3.1 B se adoptă

$$J_e = 5{,}25 \text{ A/mm}^2.$$

— Numărul de spire pe pol, conform relației (1.155 a)

$$w_e = \frac{F_{eN}}{2I_e} = \frac{14\,500}{2 \cdot 136{,}5} = 53 \text{ spire/pol.} \qquad (2.195)$$

— Numărul de conductoare într-o crestătură (adică numărul de spire pe bobină) care trebuie să fie număr întreg

$$n_{c2} = \frac{2w_e}{N_b} = \frac{2 \cdot 53}{6} = 17{,}66.$$

Se ia

$$n_{c2} = 18 \qquad (2.196)$$

și rezultă, conform relației (1.155 b)

$$w_e = \frac{n_{c2} N_b}{2} = \frac{18 \cdot 6}{2} = 54 \text{ spire/pol} \qquad (2.196 \text{ a})$$

pentru care cu relația (1.155 c) rezultă

$$I_{eN} = \frac{F_{eN}}{2w_e} = \frac{14\,500}{2 \cdot 54} = 134{,}2 \text{ A}. \qquad (2.196 \text{ b})$$

Densitatea reală de curent, recalculată cu relația (1.155 d), este

$$J_e = \frac{I_{eN}}{s_{ce}} = \frac{134{,}2}{26} = 5{,}16 \text{ A/mm}^2 \qquad (2.196 \text{ c})$$

care se încadrează în limite.

Curentul de excitație la funcționarea în gol, conform relației (1.155 e)

$$I_{e0} = \frac{U_{moN}}{2w_e} = \frac{6\,454}{2 \cdot 54} = 59{,}7 \text{ A}. \quad \Big| \quad I_{e0} = \frac{6\,847}{2 \cdot 54} = 63{,}4 \text{ A}. \qquad (2.196 \text{ d})$$

Dimensiunile definitive ale crestăturii rotorului, conform relațiilor (1.156)

$$b_{c2} = b_{cond} + b_{iz} = 10 + 1,6 = 11,6 \text{ mm};$$

$$h_{c2} = n_{c2} h_{cond} + h_{iz} = 18 \cdot 2,65 + 17,3 = 65 \text{ mm} \quad (2.197)$$

în care:

$b_{iz} = 1,6$ mm, conform relației (2.151);

$h_{iz} = 0,45 \cdot 18 = 8,1$ mm — grosimea izolațiilor conductoarelor (E2S) +

$0,22 \cdot 6 = 1,32$ mm — grosimea izolației crestăturii (2 folii NMN cu grosime 0,22 mm fiecare) +

$0,5 \cdot 1 = 0,5$ mm — grosimea izolației la baza crestăturii (sticlotextolit grosime 0,5 mm) +

$1 + 5 = 6$ mm — istmul + pana crestăturii din sticlotextolit grosime 5 mm +

$0,5 \cdot 2 = 1$ mm — izolația sub pană (2 buc. sticlotextolit gros 0,5 mm) +

0,38 mm — joc

17,3 mm.

Dimensiunile definitive ale crestăturii sînt egale cu cele estimate și deci calculele efectuate sînt bune.

— Rezistența ohmică a înfășurării de excitație conform relației (1.157 a)

$$R_{c\vartheta} = \rho_\vartheta \frac{2pw_c l_{cmed}}{s_{cc}} = 0,0265 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 654 \cdot 1,6}{26} = 0,52 \ \Omega. \quad (2.198)$$

— Verificarea tensiunii de excitație cu relația (1.157)

$$U_e = R_{c\vartheta} I_{eN} = 0,52 \cdot 134,2 = 69,78 \approx 70 \text{ V}. \quad (2.199)$$

Deoarece alimentarea înfășurării de excitație se face (în cazul de față) prin inele colectoare, tensiunea nominală de excitație, conform relației (1.157 b) este

$$U_{eN} = U_e + \Delta U_{pe} = 70 + 3 = 73 \text{ V}. \quad (2.200)$$

— Tensiunea de excitație la funcționarea în gol, conform relației (1.157 c) și relației (1.157 d)

$U_{e0N} = R_{c\vartheta a} I_{e0} + \Delta U_{pe} =$ | $U_{e0N} = 0,75 \cdot 0,52 \cdot 63,4 + 3 =$

$= 0,75 \cdot 0,52 \cdot 59,7 + 3 = 26,3$ V. | $= 27,7$ V. (2.200 a)

— Puterea de excitație nominală, conform relației (1.158)

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} = 73 \cdot 134,2 = 9\,796 \text{ W} \approx 9,8 \text{ kW}. \quad (2.201)$$

CAZUL 3. Să se proiecteze un:

GENERATOR SINCRON TRIFAZAT	MOTOR SINCRON TRIFAZAT

cu aceleași date nominale ca în cazul 1 și cazul 2, diferind construcția rotorului, care este cu *poli înecați*.

La dimensionarea statorului diferă, față de celelalte variante, următoarele elemente:

a) Factorul de formă k_B și coeficientul de acoperire ideală a pasului polar α_i, care conform paragrafului 1.1.5 B se iau ca pentru regimul sinusoidal, adică

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0,636; \quad k_B = k_f = 1,11. \quad (2.202)$$

b) Solicitările electromagnetice, care conform paragrafului 1.2.2 A, observația 2-a se iau mai mari (atît A cît și B_δ) cu $5 \div 7\%$ decît valorile rezultate din figura 1.7 (vezi relația (2.9)), adică:

$$A = (1,05 \div 1,07) \cdot 380 = 399 \div 406,6 \text{ A/cm};$$

$$B_\delta = (1,05 \div 1,07) \cdot 0,8 = 0,84 \div 0,856 \text{ T}. \quad (2.203)$$

În continuare se vor considera valorile

$$A = 407 \text{ A/cm};$$

$$B_\delta = 0,83 \text{ T}. \quad (2.203 \text{ a})$$

După cum se vede, pătura de curent are aceeași valoare ca în celelalte cazuri (vezi relația (2.9 a)), însă inducția maximă în întrefier B_δ este mai mare cu $5 \div 7\%$.

c) Lățimea întrefierului, care se va determina cu relația (1.38) nu ca în primele cazuri, cînd s-a determinat cu relația (1.36).

2.21. CALCULUL LĂȚIMII ÎNTREFIERULUI

Determinarea lățimii întrefierului, pentru mașinile cu poli înecați se face cu relația (1.38)

$$\delta = \frac{0,46 \cdot 10^{-4} A \tau}{(x_d - x_{\sigma 1}) B_\delta} = \frac{0,46 \cdot 10^{-4} \cdot 407 \cdot 28,2}{(1,45 - 0,1) \cdot 0,83} = 0,47 \text{ cm} \quad (2.204)$$

în care s-au considerat valorile

$$x_d = 1{,}45 \text{ u.r.} ; \; x_{\sigma 1} = 0{,}1 \text{ u.r.}$$

Se stabileşte

$$\delta = 0{,}475 \text{ cm} = 4{,}75 \text{ mm.} \qquad (2.204 \text{ a})$$

2.22. DIMENSIONAREA STATORULUI

Ca şi în cazul 2, se observă că dacă s-ar lua acelaşi stator ca în cazul 1, ar rezulta solicitări electromagnetice sub limitele indicate pentru această variantă de rotor.

De aceea, similar ca în cazul 2, se recalculează (tot sumar) statorul, pentru încadrarea în limite a solicitărilor electromagnetice, considerînd aceleaşi diametre D şi D_e, precum şi acelaşi număr de crestături Z_1.

1. *Lungimea ideală*, conform relaţiei (1.15) şi (2.137)

$$l_i = \frac{60 S_{1N}}{k_{CA} \pi^2 D^2 n_1 A B_\delta} = \frac{60 \cdot 500 \cdot 10^3}{0{,}654 \cdot \pi^2 \cdot 0{,}54^2 \cdot 1\,000 \cdot 407 \cdot 10^2 \cdot 0{,}83} =$$

$$= 0{,}472 \text{ m} = 47{,}2 \text{ cm} \qquad (2.205)$$

unde :

$$k_{CA} = \frac{\pi k_w}{2\sqrt{2}} \alpha_i = \frac{\pi \cdot 0{,}926}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 0{,}636 = 0{,}654.$$

2. *Geometria miezului*

Deoarece a rezultat o lungime ideală apropiată de cea din cazul 2 (vezi relaţia (2.137)) se iau

$$n_v = 7 ; \; b_v = 1 \text{ cm}$$

iar din figura 1.9, pentru $b_v = 1$ cm şi $\delta = 4{,}75$ mm, rezultă

$$b'_v = 4{,}7 \text{ mm} = 0{,}47 \text{ cm.}$$

Dimensiunile miezului :

— lungimea geometrică

$$l_g = l_i + n_v b'_v = 47{,}2 + 7 \cdot 0{,}47 = 50{,}5 \text{ cm} ;$$

— lungimea totală a pachetelor de fier

$$l_{Fe} = l_g - n_v b_v = 50{,}5 - 7 \cdot 1 = 43{,}5 \text{ cm} ; \qquad (2.206)$$

— lungimea ideală (valoare exactă)

$$l_i = l_g - n_v b'_v = 50{,}5 - 7 \cdot 0{,}47 = 47{,}2 \text{ cm.}$$

După cum se observă (vezi relaţiile (2.142)), dimensiunile geometrice ale miezului magnetic al statorului sînt identice cu cele de la cazul 2.

De aceea se menţine acelaşi stator, ca în cazul 2, inclusiv înfăşurarea şi dimensiunile crestăturii, urmînd să se recalculeze solicitările electromagnetice.

Pentru uşurinţa calculelor se reamintesc aceste date (de la cazul 2) :

$$Z_1 = 72 ; \; q = 4 ; \; y_1 = \frac{5}{6} y_\tau = 10 ; \; k_w = 0{,}926 ;$$

$$\tau = 28{,}2 \text{ cm} ; \; t_1 = 2{,}35 \text{ cm,}$$

construcţia înfăşurării fiind cea din cazul 2 (cu bobine neegale în grupe de cîte 2 bobine de acelaşi fel) ;

$n_c = 23$;	$n_c = 21$;
$w = 276$;	$w = 252$; (2.207)
$A = 395$ A/cm.	$A = 407$ A/cm.

$$b_c = 11{,}5 \text{ mm} ; \; h_c = 45{,}5 \text{ mm} ; \; h_{j1} = 5{,}45 \text{ cm.}$$

3. *Verificarea solicitărilor magnetice*

a) Fluxul maxim util la sarcină nominală (Φ_N, pentru E_{1N}) pe pol, conform relaţiei (1.27 a)

$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4 k_B f_1 w k_w} =$	$\Phi = \frac{1{,}055 \cdot 3\,464}{4 \cdot 1{,}11 \cdot 50 \cdot 252 \cdot 0{,}926} =$
$= \frac{1{,}08 \cdot 3\,637}{4 \cdot 1{,}11 \cdot 50 \cdot 276 \cdot 0{,}926} =$	$= 7{,}05 \cdot 10^{-2}$ Wb.
$= 6{,}92 \cdot 10^{-2}$ Wb.	(2.208)

Fluxul nominal la funcţionarea în gol (pentru U_{1N})

$\Phi_{0N} = \frac{\Phi}{k_E} = \frac{6{,}92 \cdot 10^{-2}}{1{,}08} =$	$\Phi_{0N} = \frac{7{,}05 \cdot 10^{-2}}{1{,}055} =$
$= 6{,}4 \cdot 10^{-2}$ Wb.	$= 6{,}68 \cdot 10^{-2}$ Wb. (2.208 a)

Deoarece, în cazul mașinilor cu poli înecați, mărimile s-au considerat sinusoidale rezultă că

$$\Phi_{1N} = \Phi_{0N} = 6{,}4 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \qquad \Phi_{1N} = 6{,}68 \cdot 10^{-2} \text{ Wb.} \tag{2.208 b}$$

b) Inducția maximă în întrefier, conform relației (1.27)

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{6{,}92 \cdot 10^{-2}}{0{,}636 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}472} = 0{,}817 \text{ T} \qquad B_\delta = \frac{7{,}05 \cdot 10^{-2}}{0{,}636 \cdot 0{,}282 \cdot 0{,}472} = 0{,}833 \text{ T} \tag{2.209}$$

adică în limitele propuse (vezi relațiile (2.203)).

c) Inducția maximă în jugul statorului, conform relației (1.34)

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 k_{Fe} l_{Fe} h'_{j1}} = \frac{6{,}92 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 0{,}0545} = 1{,}53 \text{ T} \qquad B_{j1} = \frac{7{,}05 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 0{,}0545} = 1{,}56 \text{ T} \tag{2.210}$$

valori care se consideră bune chiar dacă pentru motor se depășește cu puțin limita maximă de 1,55 T indicată în paragraful 1.3.2 B.

d) Inducția aparentă maximă, la baza dintelui statoric conform relației (1.35) și (2.145 a)

$$B'_{d1\,\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,\min}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}817}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}82 \text{ T} \qquad B'_{d1\,\max} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}833}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}86 \text{ T} \tag{2.211}$$

în limitele admisibile.

În concluzie, se constată că în cazurile 2 și 3 se folosește același stator cu aceleași solicitări electrice, însă cu solicitări magnetice diferite dar în limitele admisibile.

2.23. DIMENSIONAREA ROTORULUI

Dimensionarea rotorului se face conform paragrafului 1.6.2 B.

1. *Diametrul rotorului*, conform relației (1.57)

$$D_r = D - 2\delta = 54 - 2 \cdot 0{,}475 = 53{,}05 \text{ cm.} \tag{2.212}$$

2. *Lungimea rotorului*, conform relației (1.58) se estimează

$$l_{Fe2} = l_{Fe} + 1 \text{ cm} = 43{,}5 + 1 = 44{,}5 \text{ cm} \tag{2.213}$$

ceea ce înseamnă că pachetele de margine ale rotorului vor fi mai mari cu cîte 0,5 cm fiecare, decît pachetele de margine ale statorului. Restul pachetelor rotorului ca număr și dimensiuni (inclusiv canalele radiale) sînt identice și suprapuse peste cele ale statorului pentru ca aerul de ventilație să poată trece din canalele radiale ale rotorului în canalele radiale ale statorului.

Miezul magnetic al rotorului va avea deci $n_v = 7$ canale radiale cu $b_v = 1$ cm lățime și 8 pachete de tole, din care 6 pachete de 5.5 cm și 2 pachete (de margine) de 5,75 cm.

Lungimea geometrică a rotorului

$$l_{g2} = l_{Fe2} + n_v b_v = 44{,}5 + 7 \cdot 1 = 51{,}5 \text{ cm.} \tag{2.213 a}$$

3. *Numărul de crestături ale rotorului*

Avînd în vedere, că din motive mecanice se recomandă

$$Z'_2 < Z_1 = 72$$

se alege numărul de crestături, în ipoteza că ar fi uniform repartizate, astfel încît să satisfacă și relațiile (1.59 a), adică

$$Z'_2 = 54$$

și deci

$$\frac{Z'_2}{2p} = \frac{54}{6} = 9 = \text{număr întreg.}$$

Numărul de crestături reale, rezultă din relația (1.59)

$$Z_2 = \gamma Z'_2 = (0{,}66 \div 0{,}8) \cdot 54 = 35{,}64 \div 43{,}2$$

și dacă se ține cont de condițiile impuse de relațiile (1.59 a) se stabilește

$$Z_2 = 36.$$

Rezultă deci, pentru crestăturile rotorului următoarele valori:

$$Z'_2 = 54;$$

$$Z_2 = 36;$$

$$\gamma = \frac{Z_2}{Z'_2} = \frac{36}{54} = 0{,}666; \tag{2.214}$$

$$N_b = \frac{Z_2}{2p} = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6 = \text{număr întreg par};$$

$$N_D = \frac{Z_2'}{2p} - \frac{Z_2}{2p} = 9 - 6 = 3 \text{ crestături nebobinate pe pol}$$

(N_b, este numărul de crestături bobinate, pe pol, iar $N_b/2 = 6/2 = 3$, este numărul de bobine pe pol ale înfășurării de excitație).

4. *Dimensiunile (orientative) ale crestăturii rotorului*

— Lățimea crestăturii, conform relației (1.60)

$$b_{c2} = (0{,}35 \div 0{,}42) t_R = (0{,}35 \div 0{,}42) \cdot 3{,}08 = 1{,}08 \div 1{,}29 \text{ cm} \qquad (2.215)$$

în care:

$$t_R = \frac{\pi D_r}{Z_2'} = \frac{\pi \cdot 53{,}05}{54} = 3{,}08 \text{ cm}.$$

După cum se observă, s-au obținut pentru b_{c2}, aproximativ aceleași limite ca și în cazul 2 (vezi relația (2.150)).

De aceea, din aceleași considerente ca și în cazul 2, se alege conform relației (2.151 a)

$$b_{c2} = 11{,}6 \text{ mm}. \qquad (2.215 \text{ a})$$

ceea ce înseamnează că se va folosi tot conductor cu lățimea standardizată la valoarea

$$b_{cond} = 10 \text{ mm}.$$

— Înălțimea crestăturii, conform relației (1.61)

$$h_{c2} = (0{,}13 \div 0{,}175) D_r = (0{,}13 \div 0{,}175) \cdot 530{,}5 = 68{,}92 \div 92{,}8 \text{ mm}.$$

Se alege orientativ

$$h_{c2} = 75 \text{ mm}. \qquad (2.215 \text{ b})$$

5. *Verificarea inducției maxime la baza dintelui mare al rotorului*

a) Verificarea inducției maxime, se face conform relației (1.120)

$$B_{dR\,max} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\,min}} = \frac{5{,}44 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}077} = 1{,}67 \text{ T}$$

$$B_{dR\,max} = \frac{5{,}54 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}077} = 1{,}7 \text{ T} \qquad (2.216)$$

unde, conform relației (1.119)

$$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma = 4{,}75 \cdot 10^{-2} + 0{,}692 \cdot 10^{-2} = 5{,}44 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{Dt} = 4{,}84 \cdot 10^{-2} + 0{,}705 \cdot 10^{-2} = 5{,}54 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \qquad (2.216 \text{ a})$$

în care:

— conform relației (1.117)

$$\Phi_D = b_p' l_i B_\delta = 0{,}1232 \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}817 = 4{,}75 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\Phi_D = 0{,}1232 \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}833 = 4{,}84 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \qquad (2.216 \text{ b})$$

cu (vezi relația (1.117 a))

$$b_p' = (N_D + 1) t_R = (3 + 1) \cdot 3{,}08 = 12{,}32 \text{ cm};$$

— fluxul de scăpări estimat pentru $\sigma = 1{,}1$

$$\Phi_\sigma = (\sigma - 1)\Phi = (1{,}1 - 1) \cdot 6{,}92 \cdot 10^{-2} = 0{,}692 \cdot 10^{-2} \text{ Wb};$$

$$\Phi_\sigma = (1{,}1 - 1) \cdot 7{,}05 \cdot 10^{-2} = 0{,}705 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}; \qquad (2.216 \text{ c})$$

— conform relațiilor (1.120 a)

$$b_{DR\,min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z_2'} (N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi(53{,}05 - 2 \cdot 7{,}5)}{54} \cdot (3 + 1) - 1{,}16 = 7{,}7 \text{ cm}, \qquad (2.216 \text{ d})$$

valori (ale inducției maxime) care sînt sub limita admisă.

b) Verificarea lățimii minime a dintelui mic

$$b_{dR\,min} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z_2'} - b_{c2} = \frac{\pi(53{,}05 - 2 \cdot 7{,}5)}{54} - 1{,}16 = 1{,}05 \text{ cm} \qquad (2.217)$$

adică mult peste limita inferioară de 5 mm, ceea ce înseamnă că din punct de vedere mecanic și tehnologic nu apar dificultăți.

6. *Dimensiunile jugului rotorului*

— Înălțimea jugului rotorului, conform relației (1.63)

$$h_{j2} = \frac{\sigma\Phi}{2 k_{Fe2} l_{Fe2} B_{j2}} = \frac{1{,}1 \cdot 7{,}05 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 1{,}5} = 0{,}061 \text{ m} = 6{,}1 \text{ cm}$$

unde s-a luat, conform paragrafului 1.3.2 B

$$B_{j2} = 1{,}5 \text{ T}.$$

— Diametrul interior al rotorului, conform relației (1.64)

$$D_{ir} = D_r - 2(h_{c2} + h_{j2}) = 53{,}05 - 2(7{,}5 + 6{,}1) = 25{,}85 \text{ cm}.$$

Se rotunjește diametrul interior la valoarea

$$D_{ir} = 25 \text{ cm} \tag{2.218}$$

și rezultă înălțimea reală a jugului rotor

$$h_{j2} = \frac{D_r - D_{ir}}{2} - h_{c2} = \frac{53{,}05 - 25}{2} - 7{,}5 = 6{,}525 \text{ cm}. \tag{2.218 a}$$

2.24. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE AMORTIZARE

Înfășurarea de amortizare și de pornire în asincron, la mașinile cu poli înecați, se plasează în dintele mare așa cum este indicat în figura 1.16 b.

Dacă mașina sincronă funcționează în regim de generator independent cu autoexcitație (excitație statică de la bornele acestuia), atunci pentru mărirea remanenței magnetice, tot în dintele mare, sub înfășurarea de amortizare se pot prevede crestături dreptunghiulare închise, în care se introduc bare de oțel masiv, fără a afecta inducțiile magnetice în această zonă.

Calculul înfășurării de amortizare (respectiv de pornire) se face identic ca la mașina cu poli aparenți, conform paragrafului 1.7, cu deosebirea că în locul lățimii piesei polare b_p din relația (1.76), trebuie considerată lățimea maximă a dintelui mare, obținută din relațiile (1.128 a), adică

$$b_{DR\max} = \frac{\pi D_r}{Z_2'}(N_D + 1) - b_{c2} = \frac{\pi \cdot 53{,}05}{54}(3 + 1) - 1{,}16 =$$

$$= 11{,}18 \text{ cm}. \tag{2.219}$$

1. *Secțiunea totală a barelor pe pol*, conform relației (1.74)

$$\Sigma s_a = n_a s_a = (0{,}15 \div 0{,}3)\frac{A\tau}{J_1} = (0{,}15 \div 0{,}3)\frac{407 \cdot 28{,}2}{6{,}6} =$$

$$= 264{,}86 \div 529{,}7 \text{ mm}^2. \tag{2.220}$$

2. *Pasul crestăturilor înfășurării de amortizare* și numărul de bare pe pol, se determină rezolvînd sistemul format de relațiile

(1.75 a) și (1.76) și ținînd cont de recomandările indicate în paragraful 1.7.

Se stabilește astfel, din relația (1.75 a), pentru $n_a = 5$

$$t_a = 1{,}7 \text{ cm}$$

ceea ce corespunde lui $k = 3$.

3. *Numărul de bare pe pol* (în dintele mare), conform relației (1.76), însă cu $b_{DR\max}$, în locul lui b_p, este

$$n_a = \frac{b_{DR\max} - t_a}{t_a} = \frac{11{,}18 - 1{,}7}{1{,}7} = 5{,}57.$$

Se stabilesc valorile indicate mai sus, adică

$$n_a = 5\ ;\ t_a = 1{,}7 \text{ cm}, \tag{2.220 a}$$

urmînd ca distanțele de la marginea dintelui mare să difere puțin de $t_a/2$, cît s-a considerat în relația (1.76).

Raportul $t_a/t_1 = 1{,}7/2{,}35 = 0{,}723 < 0{,}8$ ceea ce nu prea este indicat, conform relației (1.75).

Dacă s-ar lua $n_a = 4$ și $t_a = 2{,}25$ cm (care ar corespunde tot la $k = 3$), atunci ar rezulta

$$\frac{t_a}{t_1} = \frac{2{,}25}{2{,}35} = 0{,}96 < 1$$

care este într-adevăr mai mic decît 1, însă foarte apropiat de acesta putînd apărea (pentru motor) pericolul fenomenului de lipire, la pornirea în asincron.

De aceea, se preferă prima variantă cu $n_a = 5$ și $t_a = 1{,}7$ cm.

4. *Secțiunea unei bare de amortizare*

$$s_a = \frac{\Sigma s_a}{n_a} = \frac{264{,}86 \div 529{,}7}{5} = 52{,}9 \div 105{,}9 \text{ mm}^2. \tag{2.220 b}$$

Deoarece pasul t_a este relativ mic, cît și pentru obținerea unor caracteristici de pornire în asincron bune utilizînd și fenomenul de refulare, se aleg bare dreptunghiulare cu crestături semiînchise.

Se impune raportul dimensiunilor conductorului

$$h/b = 3$$

și rezultă lățimea conductorului

$$b = \sqrt{\frac{s_a}{3}} = \sqrt{\frac{52{,}9 \div 105{,}9}{3}} = 4{,}2 \div 5{,}94 \text{ mm}.$$

Din STAS 2873-78 (anexa 5) se alege conductorul pentru bara de amortizare

$$CuEt\ 5 \times 16 = 79{,}1\ \text{mm}^2 = s_a \qquad (2.220\ c)$$

(*t*, înseamnă că materialul trebuie livrat în stare „tare").

Dimensiunile crestăturii înfășurării de amortizare (vezi și fig. 2.11) sînt:

$$b_{ca} = b + 0{,}3\ (\text{joc}) = 5 + 0{,}3 = 5{,}3\ \text{mm};$$

$$h_{ca} = h + 0{,}5\ (\text{joc}) + h_0 = 16 + 0{,}5 + 2{,}5 = 19\ \text{mm}, \qquad (2.220\ d)$$

în care s-a considerat

$$h_0 = b_0 = 2{,}5\ \text{mm}.$$

Ca material, se aleg, avînd în vedere și valorile cu rezerve cam mari pentru M_p și I_p obținute la calculul caracteristicilor de pornire de la cazul 1, pentru ambele mașini (generator și motor), bare din cupru.

O justificare în plus a alegerii acestui material și la motor, o constituie faptul că în perioada pornirii, creșterea cuplului de pornire este influențată și de apariția fenomenului de refulare în barele de secțiune dreptunghiulară.

Este evident că soluția definitivă pentru materialul barelor motorului, se stabilește după efectuarea calculului caracteristicilor de pornire, care se face după aceeași metodică ca la polii aparenți și varianta combinată, caracteristici ce trebuie apoi verificate experimental la standul de probe, pe prototip.

5. *Secțiunea transversală a inelului de scurtcircuitare*, conform relației (1.78)

$$s_i = (0{,}4 \div 0{,}5) s_a n_a = (0{,}4 \div 0{,}5) \cdot 79{,}1 \cdot 5 = 158{,}2 \div 197{,}8\ \text{mm}^2. \qquad (2.221)$$

La coliviile rotoarelor cu poli înecați, inelul de scurtcircuitare se execută din tablă groasă de cupru, care se construiește sub formă de placă frontală, închiderea ei (pentru a constitui inel complet) făcîndu-se pe sub partea frontală a înfășurării de excitație. Conturul acestei plăci este indicat (cu linie întreruptă) în figura 2.11. Din motive economice, segmentul de placă al barelor fiecărui pol se poate confecționa separat și apoi suda de inelul de scurtcircuitare, așa cum se arată în figura 2.11.

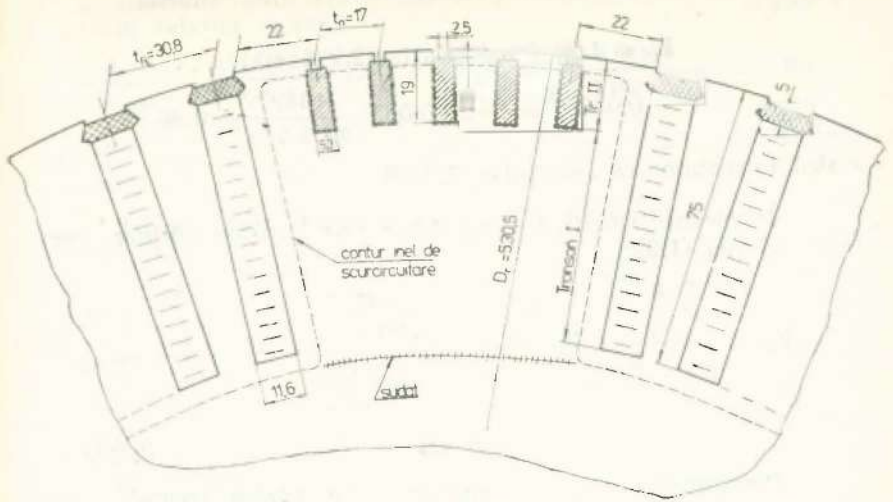


Fig. 2.11 — Secțiune transversală (la scară) pentru rotorul cu poli înecați al mașinilor sincrone de 440 kVA/400 kW ; 6,3/6 kV ; 1 000 rot/min.

2.25. PARAMETRII ÎNFĂȘURĂRII INDUSULUI (STATORULUI)

1. *Rezistența pe fază a înfășurării statorului*, este identică cu cea de la cazul 2 (vezi relația (2.158))

$r_1 = 0{,}0263$ u.r. | $r_1 = 0{,}0258$ u.r.

— *Permeanța specifică a scăpărilor în crestătură*, este identică cu cea de la cazul 2 (vezi relația (2.159))

$\lambda_{c1} = 1{,}45.$ | $\lambda_{c1} = 1{,}47.$

— *Permeanța specifică a scăpărilor diferențiale*, se schimbă față de cea dată de relația (2.160), datorită întrefierului δ. Astfel

$$\lambda_{d1} = 0{,}9 \frac{t_1 (q k_w)^2 \rho_{d1} k_0}{k_C \delta} \sigma_{d1} = 0{,}9 \cdot \frac{2{,}35 \cdot (4 \cdot 0{,}926)^2 \cdot 1 \cdot 0{,}96}{1{,}29 \cdot 0{,}475} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0{,}272 \qquad (2.222)$$

în care :

$$k_C = 1{,}29 \text{ (vezi relația (2.226 c))};$$

$$k_{\sigma 1} = 1 - 0{,}033\,\frac{a_i^2}{\delta t_1} = 1 - 0{,}033 \cdot \frac{(1{,}15)^2}{0{,}475 \cdot 2{,}35} = 0{,}96;$$

restul termenilor ca în relația (2.160).

— *Permeanța specifică a scăpărilor prin capetele dinților*, conform relației (1.92)

$$\lambda_{z1} = \frac{5\,\frac{\delta}{a_i}}{5 + 4\,\frac{\delta}{a_i}} \cdot \frac{3\beta_i + 1}{4} = \frac{5 \cdot \frac{0{,}475}{1{,}15}}{5 + 4 \cdot \frac{0{,}475}{1{,}15}} \cdot \frac{3 \cdot 0{,}833 + 1}{4} =$$

$$= 0{,}27. \qquad (2.222\text{ a})$$

— *Permeanța specifică a scăpărilor în părțile frontale*, este identică cu cea de la cazul 2 (vezi relația (2.162))

$$\lambda_{f1} = 1{,}25.$$

— *Permeanța specifică totală a înfășurării statorului*, conform relației (1.86)

$$\Sigma\lambda_1 = \lambda_{c1} + \lambda_{d1} + \lambda_{z1} + \lambda_{f1} = \quad | \quad \Sigma\lambda_1 = 1{,}47 + 0{,}272 + 0{,}27 +$$
$$= 1{,}45 + 0{,}272 + 0{,}27 + \quad | \quad + 1{,}25 = 3{,}26.$$
$$+ 1{,}25 = 3{,}24. \qquad (2.222\text{ b})$$

— *Reactanța de scăpări pe fază a înfășurării statorului*, conform relației (1.84)

$$x_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1} I_N}{U_{1N}} = \frac{7{,}67 \cdot 40{,}32}{3\,637} = \quad | \quad x_{\sigma 1} = \frac{6{,}43 \cdot 45{,}6}{3\,464} = 0{,}0846 \text{ u.r.}$$
$$= 0{,}085 \text{ u.r.} \qquad (2.223)$$

în care, conform relației (1.85)

$$X_{\sigma 1} = 0{,}158 \left(\frac{f_1}{100}\right)\left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_i}{pq}\Sigma\lambda_1 = \quad | \quad X_{\sigma 1} = 0{,}158 \cdot \left(\frac{50}{100}\right) \cdot \left(\frac{252}{100}\right)^2 \cdot \frac{47{,}2}{3 \cdot 4} \cdot$$
$$= 0{,}158 \cdot \left(\frac{50}{100}\right) \cdot \left(\frac{276}{100}\right)^2 \cdot \frac{47{,}2}{3 \cdot 4} \cdot \quad | \quad \cdot 3{,}26 = 6{,}43\ \Omega.$$
$$\cdot 3{,}24 = 7{,}67\ \Omega.$$

3. *Reactanța utilă corespunzătoare fluxului de reacție a indusului*, conform relației (1.103)

$$x_a = \frac{k_a F_a}{U_{m\delta_0}} = \frac{0{,}948 \cdot 9\,274}{6\,805} = \quad | \quad x_a = \frac{0{,}948 \cdot 9\,576}{7\,102} = 1{,}27 \text{ u.r.}$$
$$1{,}29 \text{ u.r.} \qquad (2.224)$$

în care :

$F_a = 9\,274$ A (din relația (2.165 a)) ; | $F_a = 9\,576$ A ;

$$U_{m\delta_0} = \frac{U_{m\delta}}{k_E} = \frac{7\,350}{1{,}08} = 6\,805 \text{ A} \quad | \quad U_{m\delta_0} = \frac{7\,493}{1{,}055} = 7\,102 \text{ A}$$

unde :

$U_{m\delta} = 7\,350$ A (din relația (2.225) ; | $U_{m\delta} = 7\,493$ A ;

conform relației (1.103 a)

$$k_a = \frac{\pi^2 \gamma}{8 \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\pi^2 \cdot 0{,}666}{8 \cdot \sin(0{,}666 \cdot 90°)} = 0{,}948. \qquad (2.224\text{ a})$$

4. *Reactanța sincronă*, conform relației (1.104 b)

$$x_d = x_a + x_{\sigma 1} = 1{,}29 + \quad | \quad x_d = 1{,}27 + 0{,}0846 =$$
$$+ 0{,}085 = 1{,}37 \text{ u.r.} \quad | \quad = 1{,}35 \text{ u.r.} \qquad (2.224\text{ b})$$

Restul parametrilor se calculează similar ca în exemplul de calcul din cazul 1.

2.26. CARACTERISTICILE MAGNETICE ȘI SOLENAȚIA DE EXCITAȚIE LA SARCINĂ NOMINALĂ

2.26.1. TENSIUNILE MAGNETICE ȘI TENSIUNEA MAGNETOMOTOARE LA T.E.M. NOMINALĂ

— *T.m. a întrefierului principal* pe o pereche de poli, conform relației (1.107)

$$U_{m\delta} = 2\,\frac{B_\delta}{\mu_0} k_C \delta = 2 \cdot \frac{0{,}817}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \quad | \quad U_{m\delta} = 2 \cdot \frac{0{,}833}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1{,}19 \cdot 4{,}75 \cdot$$
$$\cdot 1{,}19 \cdot 4{,}75 \cdot 10^{-3} = 7\,350 \text{ A} \quad | \quad \cdot 10^{-3} = 7\,493 \text{ A} \qquad (2.225)$$

în care coeficientul lui Carter, ținînd cont că în dintele mare există crestăturile înfășurării de amortizare, este dat de relația

$$k_C = k_{C1}k_{C2D} = 1{,}18 \cdot 1{,}01 = 1{,}19 \qquad (2.226)$$

unde :

— coeficientul lui Carter pentru stator

$$k_{C1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{2{,}35}{2{,}35 - 0{,}789 \cdot 0{,}475} = 1{,}18$$

cu :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_s}{\delta}} = \frac{\left(\frac{11{,}5}{4{,}75}\right)^0}{5 + \frac{11{,}5}{4{,}75}} = 0{,}789 ; \qquad (2.226\ a)$$

— coeficientul lui Carter, al rotorului, în zona dintelui mare unde, în cazul de față, există crestăturile de amortizare

$$k_{C2D} = \frac{t_a}{t_a - \gamma_{2D}\delta} = \frac{1{,}7}{1{,}7 - 0{,}05 \cdot 0{,}475} = 1{,}01 \qquad (2.226\ b)$$

cu :

$$\gamma_{2D} = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{2{,}5}{4{,}75}\right)^2}{5 + \frac{2{,}5}{4{,}75}} = 0{,}05.$$

OBSERVAȚIE. La calculul permanenței specifice a scăpărilor diferențiale trebuie însă folosit coeficientul lui Carter *echivalent*, **care să țină seama de existența mai multor tipuri de crestături pe periferia rotorului, dat de relația [11]**

$$k_C = k_{C1}k_{C2D}(1 - \gamma) + k_{C1}k_{C2d}\gamma = 1{,}18 \cdot 1{,}01(1 - 0{,}666) +$$

$$+ 1{,}18 \cdot 1{,}14 \cdot 0{,}666 = 1{,}29 \qquad (2.226\ c)$$

unde :

coeficientul lui Carter, al rotorului, în zona crestăturilor excitație:

$$k_{C2C} = \frac{t_R}{t_R - \gamma_{2d}\delta} = \frac{3{,}08}{3{,}08 - 0{,}8 \cdot 0{,}475} = 1{,}14 \qquad (2.226\ d)$$

cu :

$$\gamma_{2d} = \frac{\left(\frac{b_{c2}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{c2}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{11{,}6}{4{,}75}\right)^2}{5 + \frac{11{,}6}{4{,}75}} = 0{,}8.$$

— *T.m. a dinților indusului pentru o pereche de poli*

a) Inducțiile aparente în cele trei secțiuni ale dintelui conform relațiilor (1.110)

$$B'_{d\,max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}817}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}82\ \text{T} ;$$

$$B'_{d\,med} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}817}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-2}} = 1{,}56\ \text{T} ;$$

$$B'_{d\,min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,max}} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}817}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-2}} = 1{,}37\ \text{T}$$

$$B'_{d\,max} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}833}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1{,}86\ \text{T} ;$$

$$B'_{d\,med} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}833}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-2}} = 1{,}59\ \text{T} ; \qquad (2.227)$$

$$B'_{d\,min} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}472 \cdot 0{,}833}{0{,}95 \cdot 0{,}435 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-2}} = 1{,}39\ \text{T}$$

unde conform relațiilor (2.170), lățimile dinților statorului sînt :

$$b_{d\,min} = 1{,}2\ \text{cm} ;$$

$$b_{d\,med} = 1{,}4\ \text{cm} ;$$

$$b_{d\,max} = 1{,}6\ \text{cm}.$$

b) Întrucît $B'_{d\,max} > 1{,}8$ T se calculează și coeficienții dinților :

$$k_{d1} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,max}} = \frac{1{,}15 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 43{,}5 \cdot 1{,}6} = 0{,}82 ;$$

$$k_{d2} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,med}} = \frac{1{,}15 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 43{,}5 \cdot 1{,}4} = 0{,}93 ; \qquad (2.227\ a)$$

$$k_{d3} = \frac{b_c l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\,min}} = \frac{1{,}15 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 43{,}5 \cdot 1{,}2} = 1{,}09.$$

c) Pentru inducțiile și coeficienții k_d de mai sus rezultă, din anexa 2:

$H_{d\,max} = 125$ A/cm; $H_{d\,med} = 27$ A/cm; $H_{d\,min} = 9$ A/cm. | $H_{d\,max} = 160$ A/cm; $H_{d\,med} = 35$ A/cm; $H_{d\,min} = 10$ A/cm.

Valoarea medie a intensității cîmpului magnetic conform relației (1.111)

$$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{d\,max} + 4H_{d\,med} + H_{d\,min}) = \frac{1}{6}(125 + 4\cdot 27 + 9) = 40 \text{ A/cm.}$$

$$H_{d1} = \frac{1}{6}(160 + 4\cdot 35 + 10) = 51{,}6 \text{ A/cm.} \qquad (2.227\text{ b})$$

T.m. a dinților conform relației (1.109) este

$$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1} = 2\cdot 4{,}55\cdot 40 = 364 \text{ A.}$$

$$U_{md1} = 2\cdot 4{,}55\cdot 51{,}6 = 469 \text{ A.} \qquad (2.228)$$

— *T.m. a jugului statorului pentru o pereche de poli.*

Avînd în vedere valorile inducțiilor în jug (vezi relația (2.210))

$B_{j1} = 1{,}53$ T | $B_{j1} = 1{,}56$ T

din anexa 2 rezultă

$H_{j1} = 22{,}5$ A/cm. | $H_{j1} = 27$ A/cm.

T.m. a jugului statorului conform relației (1.113) este

$$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1} = 0{,}35\cdot 35{,}8\cdot 22{,}5 = 281 \text{ A}$$

unde $\zeta_1 = 0{,}35$ (din fig. 1.31).

$$U_{mj1} = 0{,}32\cdot 35{,}8\cdot 27 = 309 \text{ A} \qquad (2.229)$$

$\zeta_1 = 0{,}32$.

— T.m. a statorului

$$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1} = 7\,359 + 364 + 281 = 7\,995 \text{ A.}$$

$$U_{m\delta dj1} = 7\,493 + 469 + 309 = 8\,271 \text{ A.}$$

T.m. a rotorului, pentru o pereche de poli

— T.m. a dinților rotorului

a) Fluxul util prin dintele mare, determinat cu relația (2.216 b)

$\Phi_D = 4{,}75\cdot 10^{-2}$ Wb. | $\Phi_D = 4{,}84\cdot 10^{-2}$ Wb.

b) Fluxul de scăpări al rotorului, conform relației (1.117 b)

$\Phi_\sigma = \lambda_{\sigma e} U_{m\delta dj1} = 7\cdot 10^{-7}\cdot 7\,995 = 0{,}55\cdot 10^{-2}$ Wb | $\Phi_\sigma = 7\cdot 10^{-7}\cdot 8\,271 = 0{,}57\cdot 10^{-2}$ Wb (2.230)

în care conform relației (1.118):

$$\lambda_{\sigma e} = 2\mu_0 \frac{l_{Fe2}}{N_b}(\lambda_{ce} + \lambda_{de}) + 0{,}2\mu_0 l_R = 2\cdot 4\cdot \pi\cdot 10^{-7}\cdot \frac{0{,}445}{6}\cdot(3{,}53 + 0{,}206) + 0{,}2\cdot 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}\cdot 0{,}0308 = 7\cdot 10^{-7} \qquad (2.230\text{ a})$$

unde:

conform relației (1.118 a) și figurii 2.11, din care rezultă $h_{02} = 7$ mm

$$\lambda_{ce} = \frac{h_2}{2bc_2} + \frac{h_{02}}{b_{c2}} = \frac{68}{2\cdot 11{,}6} + \frac{7}{11{,}6} = 3{,}53;$$

conform relației (1.118 b)

$$\lambda_{de} = \frac{[l_R - 0{,}75(a_c + b_{c2})]^2}{6l_R\delta} = \frac{[3{,}08 - 0{,}75(1{,}15 + 1{,}16)]^2}{6\cdot 3{,}08\cdot 0{,}475} = 0{,}206. \qquad (2.230\text{ b})$$

c) Fluxul total care trece prin dintele mare al rotorului, conform relației (1.119)

$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma = 4{,}75\cdot 10^{-2} + 0{,}55\cdot 10^{-2} = 5{,}3\cdot 10^{-2}$ Wb. | $\Phi_{Dt} = 4{,}84\cdot 10^{-2} + 0{,}57\cdot 10^{-2} = 5{,}41\cdot 10^{-2}$ Wb. (2.230 c)

Deoarece în dintele mare există crestături ale înfășurării de amortizare, tensiunea magnetică a dinților rotorului se va calcula, împărțind înălțimea dinților mari în două tronsoane (fig. 2.11):

tronsonul I — cuprinde zona de la baza crestăturii înfășurării de excitație, pînă la baza crestăturii înfășurării de amortizare, adică pe înălțimea

$$h_I = h_{c2} - h_{ca} = 7{,}5 - 1{,}9 = 5{,}6 \text{ cm;} \qquad (2.231)$$

tronsonul II — cuprinde zona corespunzătoare înălțimii crestăturilor înfășurării de amortizare, adică pe înălțimea

$$h_{II} = h_{ca} = 1{,}9 \text{ cm.} \qquad (2.231\text{ a})$$

Se determină tensiunea magnetică pe fiecare tronson cu valoarea medie a intensității cîmpului magnetic obținută cu formula lui Simpson, valoarea totală a tensiunii magnetice în dinții rotorului obținîndu-se prin însumarea t.m. în cele două tronsoane, adică :

$$U_{mdR} = U_{mdR\,I} + U_{mdR\,II}. \tag{2.232}$$

T.m. a tronsonului I

a) Lățimile dintelui mare în zona tronsonului I, conform relațiilor (1.120 a) însă pentru înălțimea h_I :

$$b_{DR\min I} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2})}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} =$$

$$= \frac{\pi(53{,}05 - 2\cdot 7{,}5)}{54}(3 + 1) - 1{,}16 = 7{,}7 \text{ cm};$$

$$b_{DR\,med\,I} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2} + h_1)}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} = \tag{2.233}$$

$$= \frac{\pi(53{,}05 - 2\cdot 7{,}5 + 5{,}6)}{54}(3 + 1) - 1{,}16 \approx 9 \text{ cm};$$

$$b_{DR\max I} = \frac{\pi(D_r - 2h_{c2} + 2h_1)}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} =$$

$$= \frac{\pi(53{,}05 - 2\cdot 7{,}5 + 2\cdot 5{,}6)}{54}(3 + 1) - 1{,}16 = 10{,}3 \text{ cm}.$$

b) Inducțiile magnetice în cele trei secțiuni ale tronsonului I, conform relațiilor (1.120) :

$$B_{dR\max I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min I}} =$$

$$= \frac{5{,}3\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}077} = 1{,}62 \text{ T};$$

$$B_{dR\,med\,I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\,med\,I}} =$$

$$= \frac{5{,}3\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}09} = 1{,}39 \text{ T};$$

$$B_{dR\min I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\max I}} =$$

$$= \frac{5{,}3\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}103} = 1{,}21 \text{ T}.$$

$$B_{dR\max I} = \frac{5{,}41\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}077} =$$

$$= 1{,}66 \text{ T}; \tag{2.233 a}$$

$$B_{dR\,med\,I} = \frac{5{,}41\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}09} =$$

$$= 1{,}42 \text{ T};$$

$$B_{dR\min I} = \frac{5{,}41\cdot 10^{-2}}{0{,}95\cdot 0{,}445\cdot 0{,}103} =$$

$$= 1{,}24 \text{ T}.$$

c) Intensitățile cîmpului magnetic în cele trei secțiuni ale tronsonului I, rezultă din anexa 2, deoarece miezul magnetic al rotorului este din același material ca miezul statorului (din interiorul tolelor stator) :

$H_{dR\max I} = 55$ A/cm ; | $H_{dR\max I} = 70$ A/cm ;

$H_{dR\,med\,I} = 10$ A/cm ; | $H_{dR\,med\,I} = 12{,}5$ A/cm ;

$H_{dR\min I} = 5{,}5$ A/cm ; | $H_{dR\min I} = 6$ A/cm.

Valoarea medie a intensității cîmpului magnetic în tronsonul I, conform relației (1.116 a)

$$H_{dR\,I} = \frac{1}{6}(H_{dR\max I} + 4H_{dR\,med\,I} + H_{dR\min I}) = \frac{1}{6}(55 + 4\cdot 10 + 5{,}5) = 16{,}7 \text{ A/cm}.$$

$$H_{dR\,I} = \frac{1}{6}(70 + 4\cdot 12{,}5 + 6) = 21 \text{ A/cm}.$$

d) T.m. a tronsonului I, pe o pereche de poli

$$U_{mdR\,I} = 2h_1 H_{dR\,I} = 2\cdot 5{,}6\cdot 16{,}7 = 187 \text{ A}.$$

$$U_{mdR\,I} = 2\cdot 5{,}6\cdot 21 = 235 \text{ A}. \tag{2.234}$$

T.m. a tronsonului II

a) Lățimile dintelui mare în zona tronsonului II :

$$b_{DR\min II} = \frac{\pi(D_r - 2h_{II})}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} - n_a b_{ca} =$$

$$= \frac{\pi(53{,}05 - 2\cdot 1{,}9)}{54}(3 + 1) - 1{,}16 - 5\cdot 0{,}53 = 7{,}65 \text{ cm};$$

$$b_{DR\,med\,II} = \frac{\pi(D_r - h_{II})}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} - n_a b_{ca} = \tag{2.235}$$

$$= \frac{\pi(53{,}05 - 1{,}9)}{54}(3 + 1) - 1{,}16 - 5\cdot 0{,}53 = 8{,}09 \text{ cm};$$

$$b_{DR\max II} = \frac{\pi D_r}{Z'_2}(N_D + 1) - b_{c2} - n_a b_{ca} =$$

$$= \frac{\pi\cdot 53{,}05}{54}(3 + 1) - 1{,}16 - 5\cdot 0{,}53 = 8{,}53 \text{ cm}.$$

b) Inducțiile magnetice aparente în cele trei secțiuni ale tronsonului II :

$$B'_{dR\max II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\min II}} =$$

$$= \frac{5{,}3 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0765} = 1{,}63 \text{ T};$$

$$B'_{dR\max II} = \frac{5{,}41 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0765} =$$

$$= 1{,}67 \text{ T};$$

$$B'_{dR\mathrm{med}\,II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\mathrm{med}\,II}} =$$

$$= \frac{5{,}3 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0809} = 1{,}55 \text{ T};$$

$$B'_{dR\mathrm{med}\,II} = \frac{5{,}41 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0809} =$$

$$= 1{,}58 \text{ T}; \qquad (2.235\ a)$$

$$B'_{dR\min II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{DR\max II}} =$$

$$= \frac{5{,}3 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0853} = 1{,}47 \text{ T}.$$

$$B'_{dR\min II} = \frac{5{,}41 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}0853} =$$

$$= 1{,}50 \text{ T}.$$

c) Intensitățile cîmpului magnetic în cele trei secțiuni ale tronsonului II, rezultă din anexa 2 :

$H_{dR\max II} = 50$ A/cm ;
$H_{dR\mathrm{med}\,II} = 25$ A/cm ;
$H_{dR\min II} = 18$ A/cm.

$H_{dR\max II} = 70$ A/cm ;
$H_{dR\mathrm{med}\,II} = 32$ A/cm ;
$H_{dR\min II} = 20$ A/cm.

OBSERVAȚIE. În cazul în care $B'_{dRx} > 1{,}8$ T, atunci H_{dRx} se alege și în funcție de coeficientul dintelui pentru zona tronsonului II (a crestăturilor de amortizare), coeficient calculat similar ca în relațiile (1.112 a), însă cu dimensiunile corespunzătoare zonei respective a rotorului, adică

$$k_{dRx} = \frac{b_{ca} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{dax}} \qquad (2.236)$$

în care, mărimile cu indice „2" se referă la rotor, iar b_{dax}, este lățimea unui dinte din zona înfășurării de amortizare, corespunzătoare secțiunii „x" (minimă, medie, maximă), secțiune în care $B'_{dRx} > 1{,}8$ T.

În cazul de față vor fi necesari acești coeficienți, atunci cînd se calculează caracteristica magnetică, pentru valori ale lui $E > E_N$.

Valorile acestor coeficienți vor fi deci :

$$k_{dR1} = \frac{b_{ca} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{da\max}} = \frac{0{,}53 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 44{,}5 \cdot 1{,}17} = 0{,}505 ;$$

$$k_{dR2} = \frac{b_{ca} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{da\mathrm{med}}} = \frac{0{,}53 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 44{,}5 \cdot 1{,}109} = 0{,}532 ; \qquad (2.236\ a)$$

$$k_{dR3} = \frac{b_{ca} l_i}{k_{Fe2} l_{Fe2} b_{da\min}} = \frac{0{,}53 \cdot 47{,}2}{0{,}95 \cdot 44{,}5 \cdot 1{,}048} = 0{,}564 ;$$

în care :

$$b_{da\max} = t_a - b_{ca} = 1{,}7 - 0{,}53 = 1{,}17 \text{ cm} ;$$

$$b_{da\mathrm{med}} = t_a \frac{D_r - h_{II}}{D_r} - b_{ca} = 1{,}7 \cdot \frac{53{,}05 - 1{,}9}{53{,}05} - 0{,}53 = 1{,}109 \text{ cm} ;$$

$$b_{da\min} = t_a \frac{D_r - 2h_{II}}{D_r} - b_{ca} = 1{,}7 \cdot \frac{53{,}05 - 2 \cdot 1{,}9}{53{,}05} - 0{,}53 = 1{,}048 \text{ cm}.$$

(2.236 b)

După cum se vede, valorile coeficienților sînt apropiate, astfel că se putea determina doar coeficientul mediu k_{dR2}.

Valoarea medie a intensității cîmpului magnetic în tronsonul II

$$H_{dR\,II} = \frac{1}{6}(H_{dR\max II} + 4H_{dR\mathrm{med}\,II} + H_{dR\min II}) =$$

$$= \frac{1}{6}(50 + 4 \cdot 25 + 18) =$$

$$= 28 \text{ A/cm}$$

$$H_{dR\,II} = \frac{1}{6}(70 + 4 \cdot 32 + 20) = 36{,}3 \text{ A/cm}.$$

d) T.m. a tronsonului II, pe o pereche de poli

$$U_{mdR\,II} = 2h_{II} H_{dR\,II} =$$

$$= 2 \cdot 1{,}9 \cdot 28 = 106 \text{ A}.$$

$$U_{mdR\,II} = 2 \cdot 1{,}9 \cdot 36{,}3 =$$

$$= 138 \text{ A}. \qquad (2.237)$$

— T.m. a dinților rotorului, pe o pereche de poli, conform relației (2.232)

$$U_{mdR} = U_{mdR\,I} + U_{mdR\,II} =$$

$$= 187 + 106 = 293 \text{ A}.$$

$$U_{mdR} = 235 + 138 = 373 \text{ A}.$$

(2.238)

— *T.m. a jugului rotorului (inductorului) pentru o pereche de poli*

a) Lungimea medie a liniei de cîmp în jugul rotorului, conform relației (1.134)

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_{ir} + h_{j2})}{2p} = \frac{\pi(25 + 6{,}525)}{2 \cdot 3} = 16{,}5 \text{ cm.} \qquad (2.239)$$

b) Inducția magnetică, în jugul rotorului, conform relației (1.132)

$$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2k_{Fe2}l_{Fe2}h_{j2}} = \qquad \left| \qquad B_{j2} = \frac{7{,}05 \cdot 10^{-2} + 0{,}57 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}03525} = \right.$$

$$= \frac{6{,}92 \cdot 10^{-2} + 0{,}55 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}445 \cdot 0{,}06525} = \qquad \left| \qquad = 1{,}38 \text{ T.} \right. \qquad (2.240)$$

$$= 1{,}35 \text{ T.} \qquad \left|\right.$$

Din anexa 2, rezultă:

$H_{j2} = 8$ A/cm. | $H_{j2} = 9{,}5$ A/cm.

c) T.m. a jugului rotor, conform relației (1.131)

$$U_{mj2} = L_{j2}H_{j2} = 16{,}5 \cdot 8 = \qquad \left| \qquad U_{mj2} = 16{,}5 \cdot 9{,}5 = 156 \text{ A.} \right.$$

$$= 132 \text{ A.} \qquad \left|\right. \qquad (2.241)$$

T.m. a rotorului

$$U_{mR} = U_{m\delta R} + U_{mj2} = \qquad \left| \qquad U_{mR} = 373 + 156 = \right.$$

$$= 293 + 132 = 425 \text{ A.} \qquad \left| \qquad = 529 \text{ A.} \right. \qquad (2.242)$$

T.m.m. pentru t.e.m. nominală

$$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta dj1} + U_{mR} = \qquad \left| \qquad \Sigma U_{mi} = 8\,271 + 529 = \right.$$

$$= 7\,995 + 425 = 8\,420 \text{ A.} \qquad \left| \qquad = 8\,800 \text{ A.} \right. \qquad (2.243)$$

2.25.2. CONSTRUCȚIA CARACTERISTICILOR MAGNETICE ȘI DETERMINAREA SOLENAȚIEI DE EXCITAȚIE NOMINALĂ

Pe baza datelor din tabelul 2.6, se traseaza caracteristicile magnetice de funcționare în gol, care sînt reprezentate în figura 2.12 a și b.

Reactanța Potier, conform relației (1.147)

$$x_p = x_{\sigma 1} + 0{,}02 = 0{,}085 + \qquad \left| \qquad x_p = 0{,}0346 + 0{,}02 = \right.$$

$$+ 0{,}02 = 0{,}105 \text{ u.r.} \qquad \left| \qquad = 0{,}1046 \text{ u.r.} \right. \qquad (2.244)$$

TABELUL 2.6

Relația $E = \frac{E}{U_{1NM}}$	U.M.	0,55	0,85	$1(U_{1NM})$	(U_{1NM})	$k_s(E_{NM})$	1,23	1,3
	V	1905,2	2944,4	3464	3637	3354	4260,7	4503,2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi = \frac{E}{4k_{E1}f_1wk_w}$	Wb	$3{,}67 \cdot 10^{-2}$	$5{,}67 \cdot 10^{-2}$	$6{,}68 \cdot 10^{-2}$	$6{,}4 \cdot 10^{-2}$	$7{,}05 \cdot 10^{-2}$	$8{,}21 \cdot 10^{-2}$	$8{,}68 \cdot 10^{-2}$
$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau_1 l_i}$	T	0,433	0,67	0,789	0,756	0,833	0,97	1,02
$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} E_\delta k_C \delta$	A	3 906	6 036	7 102	6 805	7 493	8 735	9 232
$B'_{d\max} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}}$	T	0,96	1,49	1,76	1,69	1,86	2,16	2,28
$B'_{d\text{med}} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\text{med}}}$	T	0,82	1,27	1,50	1,44	1,58	1,89	1,95
$B'_{d\min} = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\max}}$	T	0,72	1,11	1,31	1,26	1,39	1,61	1,70
$k_{d1} = \frac{b_i l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\max}} = 0{,}82$; $k_{d2} = \frac{b_i l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\text{med}}} = 0{,}93$; $k_{d3} = \frac{b_i l_i}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}} = 1{,}09$								
$H_{d\max}$	A/cm	2,3	18	100	90	160	600	1 250
$H_{d\text{med}}$	A/cm	1,5	6,5	19,5	14,5	35	150	240
$H_{d\min}$	A/cm	1,2	3,7	7,2	6	10	40	90

TABELUL 2.6 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_{d1} = \frac{1}{6}(H_{d\max} + 4H_{d\med} + H_{d\min})$	A/cm	1,58	7,95	30,86	25,66	51,6	206,66	383,33
$U_{md1} = 2h_{c1}H_{d1}$	A	11,38	72,34	281	233	469	1 880	3 488
$B_{j1} = \frac{\Phi}{2k_{Fe}l_{Fe}h_{j1}}$	T	0,80	1,24	1,47	1,42	1,56	1,80	1,91
H_{j1}	A/cm	1,56	5,5	17,5	12	27	125	205
$U_{mj1} = \zeta_1 L_{j1} H_{j1}$ (ζ_1)	A	29 (0,52)	96 (0,48)	244 (0,39)	171 (0,4)	309 (0,32)	1 253 (0,23)	1 834 (0,27)
$U_{m\delta dj1} = U_{m\delta} + U_{md1} + U_{mj1}$	A	3 949	6 201	7 627	7 209	8 271	11 868	14 554
$\Phi_D = b'_p l_i B_\delta$	Wb	$2,51 \cdot 10^{-2}$	$3,89 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$4,39 \cdot 10^{-2}$	$4,84 \cdot 10^{-2}$	$5,63 \cdot 10^{-2}$	$5,95 \cdot 10^{-2}$
$\Phi_\sigma = \lambda_{\sigma c} U_{m\delta dj1}$	Wb	$0,27 \cdot 10^{-2}$	$0,43 \cdot 10^{-2}$	$0,53 \cdot 10^{-2}$	$0,50 \cdot 10^{-2}$	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,83 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{-2}$
$\Phi_{Dt} = \Phi_D + \Phi_\sigma$	Wb	$2,78 \cdot 10^{-2}$	$4,32 \cdot 10^{-2}$	$5,11 \cdot 10^{-2}$	$4,89 \cdot 10^{-2}$	$5,41 \cdot 10^{-2}$	$6,46 \cdot 10^{-2}$	$6,96 \cdot 10^{-2}$
$B_{dR\max I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\min I}}$	T	0,85	1,32	1,56	1,50	1,66	1,98	2,13
$B_{dR\med I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\med I}}$	T	0,73	1,13	1,34	1,28	1,42	1,69	1,82
$B_{dR\min I} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\max I}}$	T	0,63	0,99	1,17	1,12	1,21	1,48	1,59

TABELUL 2.6 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_{dR\max I}$	A/cm	1,7	7,5	32,5	20	70	330	1 250
$H_{dR\med I}$	A/cm	1,2	4,2	8	6,7	12,5	85	135
$H_{dR\min I}$	A/cm	1	2,6	4,7	4	6	18	35
$U_{dRI} = \frac{1}{6}(H_{dR\max I} + 4H_{dR\med I} + H_{dR\min I})$	A/cm	1,25	4,48	11,53	8,46	21	114	304
$U_{mdRI} = 2h_1 H_{dRI}$	A	14	50	129	94	235	1 276	3 405
$B'_{dR\max II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\min II}}$	T	0,859	1,33	1,58	1,51	1,67	1,99	2,15
$B'_{dR\med II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\med II}}$	T	0,81	1,26	1,49	1,43	1,58	1,88	2,03
$B'_{dR\min II} = \frac{\Phi_{Dt}}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{DR\max II}}$	T	0,77	1,19	1,41	1,35	1,5	1,79	1,93
$k_{dR1} = \frac{b_{ca}l_i}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{da\max}} = 0,505$;		$k_{dR2} = \frac{b_{ca}l_i}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{da\med}} = 0,532$ ·			$k_{dR3} = \frac{b_{ca}l_i}{k_{Fe2}l_{Fe2}b_{da\min}} = 0,564$			
$H_{dR\max II}$	A/cm	1,8	8	35	21	70	325	775

Tabelul 2.6 (continuare)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$H_{dR\,med\,II}$	A/cm	1,5	6,3	20	13,5	32	195	350
	$H_{dR\,min\,II}$	A/cm	1,3	5	11	8,5	20	120	240
	$H_{dR\,II} = \frac{1}{6}(H_{dR\,max\,II} + 4H_{dR\,med\,II} + H_{dR\,min\,II})$	A/cm	1,51	6,36	21	13,9	36,3	201	402
	$U_{mdR\,II} = 2h_{\delta 1} H_{dR\,II}$	A	6	24	80	53	138	775	1 527
	$U_{mdR} = U_{mdR\,I} + U_{mdR\,II}$	A	20	74	209	147	373	2 051	4 932
	$B_{j2} = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2k_{Fe2} l_{Fe2} h_{j2}}$	T	0,71	1,1	1,3	1,25	1,38	1,63	1,75
	H_{j2}	A/cm	1,1	3,7	7	5,9	9,5	50	100
	$U_{mj2} = L_{j2} H_{j2}$	A	18	61	115	97	156	825	1 650
	$U_{mR} = U_{mdR} + U_{mj2}$	A	38	135	321	244	529	2 876	6 582
	$\Sigma U_{mi} = U_{m\delta dj1} + U_{mR}$	A	3 987	6 339	7 951	7 453	8 800	11 744	21 136
GENERATOR | MOTOR	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,55	0,85	1	—	1,055	1,23	1,3
	$\Sigma \underset{\sim}{U}_{mi} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,5	0,79	1	—	1,10	1,85	2,65
	$\underset{\sim}{\Phi} = \Phi/\Phi_{0N}$	u.r.	0,57	0,88	—	1	1,10	1,28	1,35
	$\Sigma \underset{\sim}{U}_{mi} = \Sigma U_{mi}/U_{m0N}$	u.r.	0,53	0,85	—	1	1,18	1,97	2,83

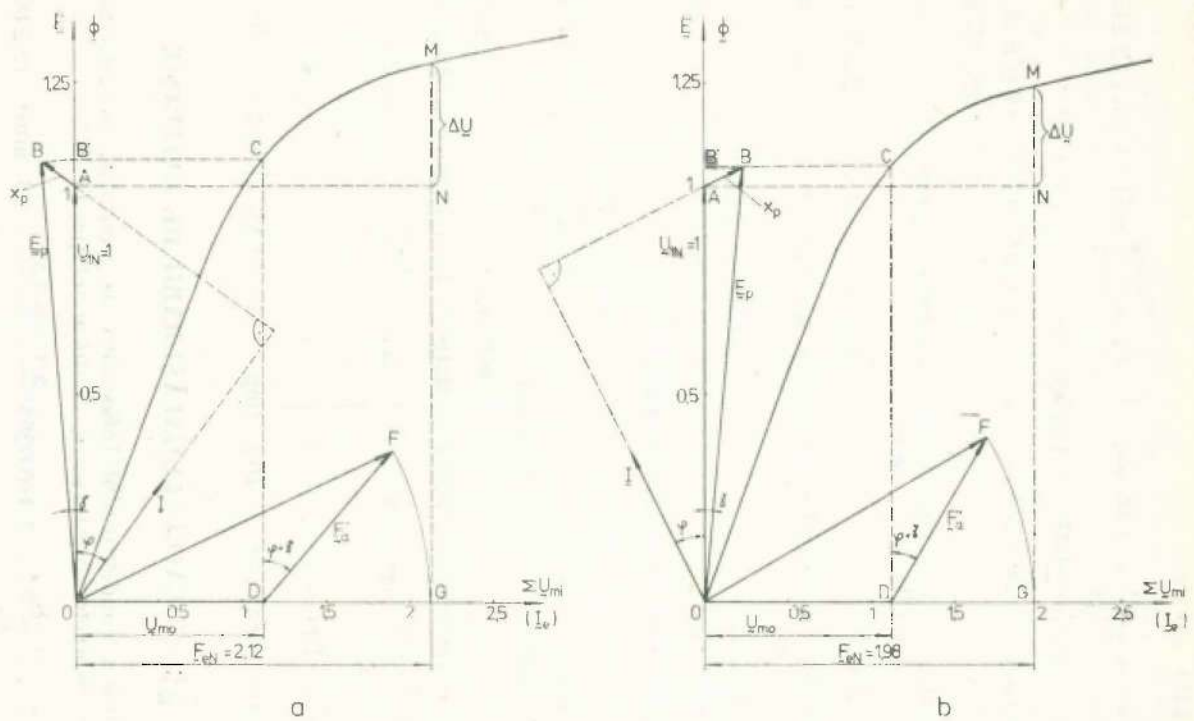


Fig. 2.12 — Caracteristicile magnetice de funcționare în gol și determinarea solenației de excitație la sarcină nominală pentru mașinile sincrone cu poli înecați :

a — generator de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min ; b — motor de 400 kW ; 6 kV ; 1 000 rot min.

Solenația de reacție a indusului echivalentă, conform relației (1.148), în u.r.

$$\underset{\sim}{F}'_a = \frac{F'_a}{U_{m0N}} = \frac{8\,791}{7\,453} = 1{,}18 \text{ u.r.} \quad | \quad \underset{\sim}{F}'_a = \frac{9\,078}{7\,951} = 1{,}14 \text{ u.r.} \quad (2.245)$$

în care, conform relației (1.148 a)

$$F'_a = k_a F_a = 0{,}948 \cdot 9\,274 = 8\,791 \text{ A} \quad | \quad F'_a = 0{,}948 \cdot 9\,576 = 9\,078 \text{ A} \quad (2.245 \text{ a})$$

unde pentru k_a, vezi relația (2.224 a), iar U_{m0N} este ΣU_{mi} pentru U_{1N}, care din tabelul 2.6 este

$$U_{m0N} = 7\,453 \text{ A.} \quad | \quad U_{m0N} = 7\,951 \text{ A.} \quad (2.245 \text{ b})$$

Solenația de excitație la sarcină nominală rezultă, conform relației (1.149),

din figura 2.12 a | din figura 2.12 b

$$\underset{\sim}{F}_{eN} = \overline{OG} = 2{,}12 \text{ u.r.} \quad | \quad \underset{\sim}{F}_{eN} = \overline{OG} = 1{,}98 \text{ u.r.} \quad (2.246)$$

sau, în A, conform relației (1.149 a)

$$F_{eN} = \underset{\sim}{F}_{eN} U_{m0N} = 2{,}12 \cdot 7\,453 = 15\,800 \text{ A.} \quad | \quad F_{eN} = 1{,}98 \cdot 7\,951 = 15\,742 \text{ A.} \quad (2.246 \text{ a})$$

Se ia, pentru ambele regimuri,

$$F_{eN} = 15\,800 \text{ A.} \quad (2.247)$$

Căderea de tensiune, conform relației (1.150) și figurii 2.12 a și b,

$$\Delta U = \frac{\overline{GM} - \overline{GN}}{\overline{GN}} \cdot 100 = \frac{1{,}29 - 1}{1} \cdot 100 = 29\% \quad | \quad \Delta U = \frac{1{,}24 - 1}{1} \cdot 100 = 24\%$$

care se încadrează în limitele impuse de STAS 1893-78.

2.27. CALCULUL ÎNFĂȘURĂRII DE EXCITAȚIE

Secțiunea conductorului înfășurării de excitație, considerînd că toate bobinele sînt în serie, conform relației (1.153)

$$s_{ce} = 1{,}1 \rho_\vartheta \frac{p F_{eN} l_{emed}}{U_e} = 1{,}1 \cdot 0{,}0265 \cdot \frac{3 \cdot 15\,800 \cdot 1{,}52}{75} = 28 \text{ mm}^2 \quad (2.248)$$

unde :

$U_e = 75$ V, ca și la cazul 2, este stabilită conform relației (1.152).

Lungimea medie a spirei înfășurării de excitație s-a determinat făcînd construcția la scară a capetelor frontale așa cum se indică în figura 1.42 b. Construcția la scară este similară cu cea pentru cazul 2 (rotorul în variantă combinată), reprezentată în figura 2.10, în care s-au folosit următoarele valori pentru elementele constructive :

$$l_{fmed} = \frac{\pi(D_- - h_{c2})}{Z_2'} = \frac{\pi(53{,}05 - 7{,}5)}{54} = 2{,}65 \text{ cm;}$$

$$a = 2 \text{ cm ;}$$

$$R = 1{,}5 \text{ cm ;}$$

$$\Delta_{fz} = 0{,}5 \text{ cm ;}$$

$$C_1 = a + R + 0{,}2 = 2 + 1{,}5 + 0{,}2 = 3{,}7 \text{ cm ;} \quad (2.249)$$

$$R_1 = 25 \text{ cm.}$$

Din desenul la scară au rezultat (pentru unele notații vezi fig. 2.10) :

$$l_{fmed1} = 2a + \pi r_{med1} + 2l_{CD} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 21 + 2 \cdot 33 = 172 \text{ mm} = 17{,}2 \text{ cm ;}$$

$$l_{fmed2} = 2a + \pi r_{med2} + 2l_{C'D'} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 36 + 2 \cdot 47 = 247 \text{ mm} = 24{,}7 \text{ cm ;} \quad (2.250)$$

$$l_{fmed3} = 2a + \pi r_{med3} + 2l_{C''D''} = 2 \cdot 20 + \pi \cdot 48 + 2 \cdot 60 = 311 \text{ mm} = 31{,}1 \text{ cm}$$

unde :

$$r_{med1} = 21 \text{ mm ;}$$

$$r_{med2} = 36 \text{ mm ;}$$

$$r_{med3} = 48 \text{ mm ;}$$

$$l_{CD} = 33 \text{ mm ;}$$

$$l_{C'D'} = 47 \text{ mm ;}$$

$$l_{C''D''} = 60 \text{ mm.}$$

Lungimea medie a spirelor bobinelor de excitație:

$$l_{e\,med1} = 2(l_{g2} + l_{f\,med1}) = 2\cdot(51{,}5 + 17{,}2) = 137{,}4 \text{ cm} = 1{,}374 \text{ m};$$

$$l_{e\,med2} = 2(l_{g2} + l_{f\,med2}) = 2\cdot(51{,}5 + 24{,}7) = 152{,}4 \text{ cm} = 1{,}524 \text{ m}; \quad (2.250\text{ a})$$

$$l_{e\,med3} = 2(l_{g2} + l_{f\,med3}) = 2\cdot(51{,}5 + 31{,}1) = 165{,}2 \text{ cm} = 1{,}652 \text{ m}.$$

Lungimea medie rezultantă va fi

$$l_{e\,med} = \frac{l_{e\,med1} + l_{e\,med2} + l_{e\,med3}}{N_b/2} = \frac{1{,}374 + 1{,}524 + 1{,}652}{6/2} = 1{,}52 \text{ m}. \quad (2.251)$$

Din STAS 2873-78 (anexa 5), pentru aceeași lățime a conductorului înfășurării de excitație ca în cazul 2 (vezi relația (2.215 a) în care s-a considerat $b_{cond} = 10$ mm), se ia conductorul

$$CuEm\ 10 \times 2{,}8\ PE2S = 27{,}5\ mm^2. \quad (2.252)$$

— Curentul de excitație, conform relației (1.155)

$$I_e = s_{ce}J_e = 27{,}5\cdot 5 = 137{,}5 \text{ A}$$

în care, conform paragrafului 1.3.1 B se adoptă, pentru mașinile cu poli înecați

$$J_e = 5 \text{ A/mm}^2.$$

— Numărul de spire pe pol, conform relației (1.155 a)

$$w_e = \frac{F_{eN}}{2I_e} = \frac{15\,800}{2\cdot 137{,}5} = 57{,}45 \text{ spire}.$$

— Numărul de conductoare într-o crestătură (adică numărul de spire pe bobină), care trebuie să fie număr întreg

$$n_{c2} = \frac{2w_e}{N_b} = \frac{2\cdot 57{,}45}{6} = 19{,}15.$$

Se ia pentru n_{c2}, valoarea rotunjită

$$n_{c2} = 20 \quad (2.253)$$

și rezultă

$$w_e = \frac{n_{c2}N_b}{2} = \frac{20\cdot 6}{2} = 60 \text{ spire/pol} \quad (2.253\text{ a})$$

pentru care, cu relația (1.155 c) rezultă

$$I_{eN} = \frac{F_{eN}}{2w_e} = \frac{15\,800}{2\cdot 60} = 131{,}6 \text{ A}. \quad (2.253\text{ b})$$

Densitatea reală de curent, recalculat cu relația (1.155 d), este

$$J_e = \frac{I_{eN}}{s_{ce}} = \frac{131{,}6}{27{,}5} = 4{,}78 \text{ A/mm}^2. \quad (2.253\text{ c})$$

Curentul de excitație la funcționarea în gol, conform relației (1.155 e)

$$I_{e0} = \frac{U_{moN}}{2w_e} = \frac{7\,453}{2\cdot 60} = 62{,}1 \text{ A}. \qquad I_{e0} = \frac{7\,951}{2\cdot 60} = 66{,}25 \text{ A}. \quad (2.253\text{ d})$$

Dimensiunile definitive ale crestăturii rotorului rezultă, conform relațiilor (1.156) și relațiilor (2.197) de la cazul 2:

$$b_{c2} = b_{cond} + b_{iz} = 10 + 1{,}6 = 11{,}6 \text{ mm};$$

$$h_{c2} = n_{c2}h_{cond} + h_{iz} = 20\cdot 2{,}8 + 18{,}2 = 74{,}2 \text{ mm}$$

unde, în baza relațiilor (2.197), $h_{iz} = 17{,}3 + 2\cdot 0{,}45 = 18{,}2$ mm deoarece se mai adaugă încă două grosimi ale izolației E2S (în cazul de față sînt 20 conductoare, față de 18 conductoare în crestătură cîte erau la cazul 2).

Prin rotunjire, avînd în vedere dimensiunile destul de mari ale înălțimii crestăturii rotorului, se iau

$$b_{c2} = 11{,}6 \text{ mm}; \quad (2.254)$$

$$h_{c2} = 75 \text{ mm};$$

adică atît cît s-au și estimat, urmînd ca spațiul în plus pe înălțime de 0,8 mm să fie completat cu adausuri la baza crestăturii și sub pană.

— Rezistența ohmică a înfășurării de excitație, conform relației (1.157 a)

$$R_{e\vartheta} = \rho_\vartheta \frac{2pw_e l_{e\,med}}{s_{ce}} = 0{,}0265\cdot \frac{2\cdot 3\cdot 60\cdot 1{,}52}{27{,}5} = 0{,}527\ \Omega. \quad (2.255)$$

Verificarea tensiunii de excitație cu relația (1.157)

$$U_e = R_{e\vartheta} I_{eN} = 0{,}527 \cdot 131{,}6 = 69{,}3 \text{ V}. \qquad (2.256)$$

Ca și în celelalte cazuri, considerînd că alimentarea înfășurării de excitație se face prin inele colectoare, tensiunea de excitație nominală, conform relației (1.157 b) este

$$U_{eN} = U_e + \Delta U_{pe} = 69{,}3 + 3 = 72{,}3 \text{ V}. \qquad (2.257)$$

Tensiunea de excitație la funcționarea în gol, conform relațiilor (1.157 c) și (1.157 d)

$$U_{e0N} = 0{,}75 R_{e\vartheta} I_{e0} + \Delta U_{pe} = 0{,}75 \cdot 0{,}527 \cdot 62{,}1 + 3 = 27{,}5 \text{ V} \quad | \quad U_{e0N} = 0{,}75 \cdot 0{,}257 \cdot 66{,}25 + 3 = 29{,}1 \text{ V}. \qquad (2.258)$$

Puterea de excitație nominală, conform relației (1.158)

$$P_{eN} = U_{eN} I_{eN} = 72{,}3 \cdot 131{,}6 = 9\,514 \text{ W} \approx 9{,}52 \text{ kW}. \qquad (2.259)$$

Din comparația celor trei cazuri practice prezentate, pentru cele trei variante constructive ale rotorului, se desprind următoarele observații :

— mașina cu poli aparenți deși are o serie de avantaje funcționale, în ceea ce privește forma curbei cîmpului magnetic în întrefier și sistemul de amortizare și pornire în asincron, necesită un volum mai mare decît celelalte variante (lungimea geometrică a acesteia este cu 6,5 cm mai mare). Acest lucru se datorește în principal reducerii cu cca 5% a solicitărilor electromagnetice, deoarece condițiile de ventilație sînt ceva mai reduse (nu are canale de ventilație radială și în rotor) ;

— celelalte două variante constructive ale rotorului (varianta combinată și cu poli înecați) necesită o putere de excitație mai mare decît cea cu poli aparenți, însă consumul de cupru pentru înfășurarea de excitație este mult mai mic.

2.28. CARACTERISTICILE EXTERNĂ ȘI DE REGLAJ ALE GENERATORULUI SINCRON CU POLI ÎNECAȚI

Deoarece prezintă cel mai mult interes, se vor trasa aceste caracteristici pentru valorile nominale ale mașinii. Metoda de calcul va fi cea indicată la paragraful 1.14, punctul F.

a. *Caracteristica externă*, $U_1 = f(I_1)$ se va determina deci, pentru curentul de excitație nominal I_{eN} și factorul de putere nominal $\cos \varphi_N = 0{,}8$.

În figura 2.13 sînt trasate atît caracteristica magnetică reală de funcționare în gol (1), în unități relative, conform tabelului 2.6 pentru generator (vezi fig. 2.12 a), cît și caracteristicile liniară (2) și liniarizate (3) de funcționare în gol, pentru cîteva puncte (pentru punctul 3 de pe caracteristica reală, caracteristica liniarizată este chiar cea liniară, deoarece punctul 3 se află în zona nesaturată a caracteristicii reale).

Pentru trasarea caracteristicii externe se aleg următoarele puncte :

— punctul 1 — pentru $\underset{\sim}{E}_{1(1)} = 1{,}23$ u.r. ;
— punctul 2 — pentru $\underset{\sim}{E}_{1(2)} = 1$ u.r. ;
— punctul 3 — pentru $\underset{\sim}{E}_{1(3)} = 0{,}6$ u.r.

Pentru mai multă ușurință a calculului se reamintesc principalele date de calcul :

— în unități absolute :

$$U_{1N} = 3\,637 \text{ V} ; \; I_{1N} = 40{,}32 \text{ A} ; \; I_{e0} = 62{,}1 \text{ A} ; \; I_{eN} = 131{,}6 \text{ A} ;$$

— în unități relative :

$$\underset{\sim}{U}_{1N} = 1 \text{ u.r.} ; \; \underset{\sim}{I}_{1N} = 1 \text{ u.r.} ; \; \underset{\sim}{I}_{e0} = 1 \text{ u.r.} ; \; \underset{\sim}{I}_{eN} = 2{,}12 \text{ u.r.};$$

$$r_1 = 0{,}0263 \text{ u.r.} ; \; x_{\sigma 1} = 0{,}085 \text{ u.r.} ; \; x_a = 1{,}29 \text{ u.r.} ;$$

$$x_p = x_{\sigma 1} + 0{,}02 = 0{,}105 \text{ u.r.}$$

Calculul tensiunii la borne U_1 și curentului din stator I_1, se face pentru fiecare punct stabilit mai sus.

— *Punctul 1*

Pentru $\underset{\sim}{E}_{1(1)} = 1{,}23$ u.r., din figura 2.13 rezultă :

$$\underset{\sim}{E}'_{0(1)} = 1{,}6 \text{ u.r. și } \underset{\sim}{E}'_{0s(1)} = 1{,}7 \text{ u.r.} \qquad (2.260)$$

Valorile saturate ale reactanțelor (pentru acest punct) conform celor considerate în relațiile (1.190 c) :

— reactanța utilă

$$x_{as} = x_a \frac{\underset{\sim}{E}_{1(1)}}{\underset{\sim}{E}'_{0(1)}} = 1{,}29 \frac{1{,}23}{1{,}6} = 0{,}99 \text{ u.r.} ;$$

— reactanța sincronă

$$x_{ds} = x_{as} + x_p = 0{,}99 + 0{,}105 = 1{,}095 \text{ u.r.}$$

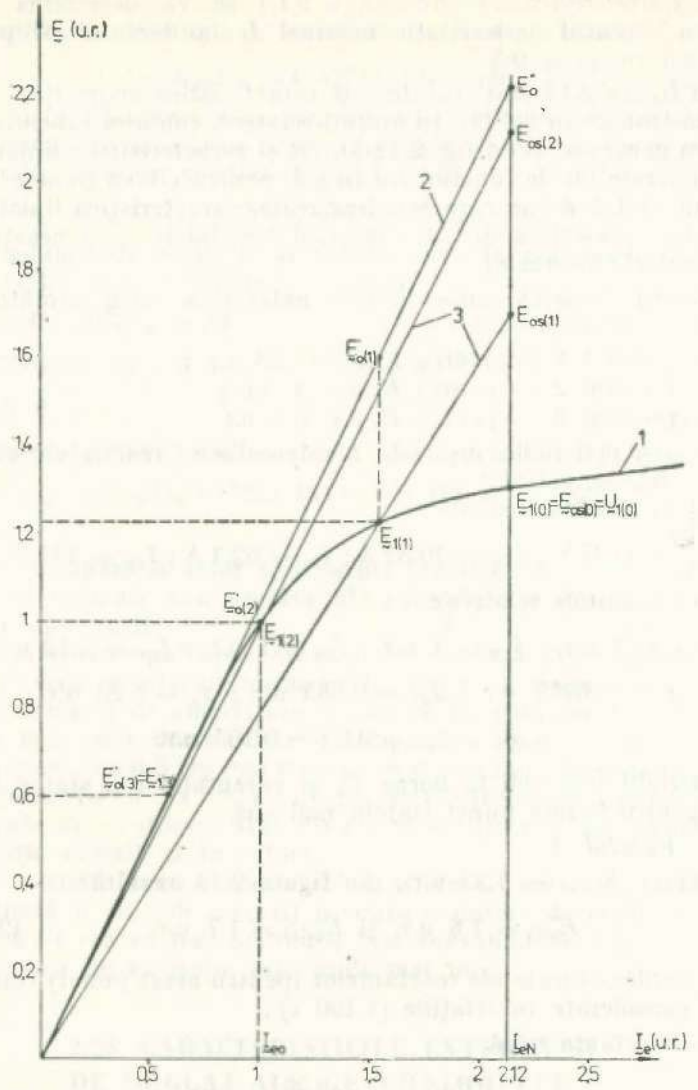


Fig. 2.13 — Caracteristicile magnetice de funcționare în gol ale generatorului sincron cu poli înecați de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min :

1 — caracteristica reală ; 2 — caracteristica liniară ; 3 — caracteristicile liniarizate.

Determinarea notațiilor de calcul al impedanței de sarcină, conform relațiilor (1.191) :

$$u = \frac{\underline{E}_{1(1)}}{\underline{E}'_{os(1)}} = \frac{1,23}{1,7} = 0,723 ;$$

$$s = 1 - u^2 = 1 - 0,723^2 = 0,477 ;$$

$$p = (u^2 x_{ds} - x_p) \sin \varphi - s r_1 \cos \varphi = (0,723^2 \cdot 1,095 - 0,105) \cdot 0,6 - 0,477 \cdot 0,0263 \cdot 0,8 = 0,27 ; \quad (2.261)$$

$$z_{ds}^2 = x_{ds}^2 + r_1^2 = 1,095^2 + 0,0263^2 = 1,2 ;$$

$$z_p^2 = x_p^2 + r_1^2 = 0,105^2 + 0,0263^2 = 0,0117 ;$$

$$q = u^2 z_{ds}^2 - z_p^2 = 0,723^2 \cdot 1,2 - 0,0117 = 0,61.$$

— Impedanța de sarcină, conform relației (1.191 a)

$$z_{(1)} = \frac{p + \sqrt{p^2 + sq}}{s} = \frac{0,27 + \sqrt{0,27^2 + 0,477 \cdot 0,61}}{0,477} = 1,83 \text{ u.r.} \quad (2.262)$$

— Curentul de sarcină din stator, conform relației (1.191 b)

$$\underline{I}_{1(1)} = \frac{\underline{E}_{1(1)}}{\sqrt{z^2 + 2z(x_p \sin \varphi + r_1 \cos \varphi) + x_p^2}} =$$

$$= \frac{1,23}{\sqrt{1,83^2 + 2 \cdot 1,83(0,105 \cdot 0,6 + 0,0263 \cdot 0,8) + 0,105^2}} = 0,64 \text{ u.r.} \quad (2.263)$$

— Tensiunea de fază, la bornele generatorului, conform relației (1.191 c)

$$\underline{U}_{1(1)} = z_{(1)} \underline{I}_{1(1)} = 1,83 \cdot 0,64 = 1,17 \text{ u.r.} \quad (2.264)$$

Se procedează similar și pentru punctele 2 și 3 stabilite mai sus, obținîndu-se valorile :

— pentru punctul 2

$$\underline{I}_{1(2)} = 1,045 \text{ u.r.} ; \ \underline{U}_{1(2)} = 0,912 \text{ u.r.} ; \quad (2.265)$$

— pentru punctul 3

$$\underline{I}_{1(3)} = 1,35 \text{ u.r.} ; \ \underline{U}_{1(3)} = 0,482 \text{ u.r.} \quad (2.266)$$

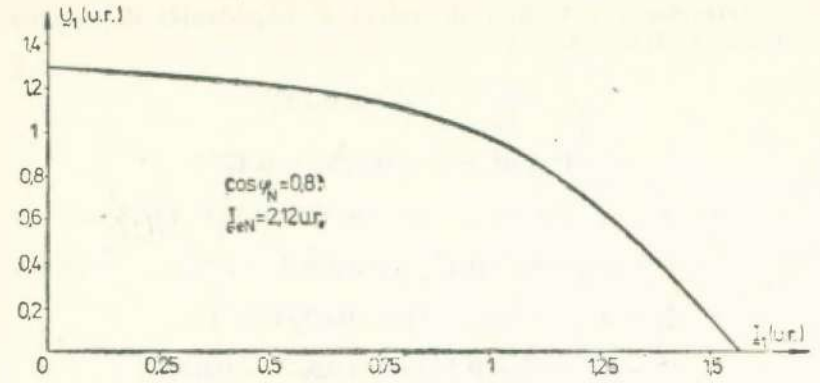


Fig. 2.14 — Caracteristica externă a generatorului sincron cu poli înecați de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min.

Punctele extreme ale caracteristicii externe sînt :

— la funcționarea în gol, pentru $\underset{\sim}{I}_{eN}$ (fig. 2.13)

$$\underset{\sim}{I}_{1(0)} = 0 \; ; \quad \underset{\sim}{U}_{1(0)} = \underset{\sim}{E}_{1(0)} = \underset{\sim}{E}_{0s(0)} = \underset{\sim}{U}_{1N} + \Delta\underset{\sim}{U} = 1{,}3 \text{ u.r.} ; \tag{2.267}$$

— la funcționarea în scurtcircuit, pentru $\underset{\sim}{I}_{eN}$ (fig. 2.13)

$$\underset{\sim}{U}_{1(k)} = 0 \; ; \quad \underset{\sim}{I}_{kN} = \frac{\underset{\sim}{E}''_0}{x_d} = \frac{2{,}2}{1{,}395} = 1{,}57 \text{ u.r.} \tag{2.268}$$

pentru valoarea nesaturată a reactanței sincrone

$$x_d = x_a + x_p = 1{,}29 + 0{,}105 = 1{,}395 \text{ u.r.}$$

Forma caracteristicii externe, pentru $\underset{\sim}{I}_{eN} = 2{,}12$ u.r. ($I_{eN} = 131{,}6$ A) cos $\varphi_N = 0{,}8$, este reprezentată în figura 2.14. Se observă că pe caracteristică se regăsesc cu destulă exactitate, și valorile corespunzătoare punctului nominal ($\underset{\sim}{U}_{1N} = 1$; $\underset{\sim}{I}_{1N} = 1$), deși acesta nu a fost calculat ca punct separat al caracteristicii.

b. *Caracteristica de reglaj.* $I_e = f(I_1)$ se va determina de asemenea pentru datele nominale ale generatorului adică pentru $\underset{\sim}{U}_1 = \underset{\sim}{U}_{1N} = 1$ u.r. și cos $\varphi = 0{,}8$ (datele mașinii sînt cele de la exemplul precedent, expus la punctul a).

Ca și în cazul a, se stabilesc mai întîi punctele pentru care se vor efectua calculele.

După cum se observă, din calculul electromagnetic al generatorului au rezultat deja două puncte ale caracteristicii de reglaj :

— pentru funcționarea în gol, la tensiunea nominală

$$\underset{\sim}{I}_1 = 0 \; ; \quad \underset{\sim}{I}_e = \underset{\sim}{I}_{e0} = 1 \text{ u.r.} ; \tag{2.269}$$

— pentru funcționarea la sarcină nominală

$$\underset{\sim}{I}_1 = \underset{\sim}{I}_{1N} = 1 \text{ u.r.} ; \quad \underset{\sim}{I}_e = \underset{\sim}{I}_{eN} = 2{,}12 \text{ u.r.} \tag{2.269 a}$$

În continuare se expune calculul curentului de excitație pentru diferite puncte, corespunzătoare diferitelor valori alese pentru curentul de sarcină $\underset{\sim}{I}_1$.

Punctul 1, pentru $\underset{\sim}{I}_1 = 0{,}5$ u.r.

T.e.m. rezultantă conform relației (1.190 b)

$$\underset{\sim}{E}_{1(1)} = \sqrt{\underset{\sim}{U}_1^2 + 2\underset{\sim}{U}_1\underset{\sim}{I}_1(x_p \sin\varphi + r_1\cos\varphi) + \underset{\sim}{I}_1^2 x_p^2} =$$

$$= \sqrt{1^2 + 2\cdot 1\cdot 0{,}5(0{,}105\cdot 0{,}6 + 0{,}0263\cdot 0{,}8) + 0{,}5^2\cdot 0{,}105^2} =$$

$$= 1{,}04 \text{ r.} \tag{2.270}$$

Din figura 2.13, pentru $\underset{\sim}{E}_{1(1)} = 1{,}04$ u.r., corespunde $\underset{\sim}{E}'_{0(1)} = 1{,}14$ u.r.

Valorile saturate ale reactanțelor, conform relațiilor (1.191 d)

$$x_{as} = x_a \frac{\underset{\sim}{E}_{1(1)}}{\underset{\sim}{E}'_{0(1)}} = 1{,}29\,\frac{1{,}04}{1{,}14} = 1{,}17 \text{ u.r.} ;$$

$$x_{ds} = x_{as} + x_p = 1{,}17 + 0{,}105 = 1{,}275 \text{ u.r.} \tag{2.270 a}$$

T.e.m. saturată conform relației (1.190 b)

$$\underset{\sim}{E}_{0s(1)} = \sqrt{\underset{\sim}{U}_1^2 + 2\underset{\sim}{U}_1\underset{\sim}{I}_1(x_{ds} \sin\varphi + r_1 \cos\varphi) + \underset{\sim}{I}_1^2 x_{ds}^2} =$$

$$= \sqrt{1^2 + 2\cdot 1\cdot 0{,}5(1{,}275\cdot 0{,}6 + 0{,}0263\cdot 0{,}8) + 0{,}5^2\cdot 1{,}275^2} =$$

$$= 1{,}48 \text{ u.r.} \tag{2.270 b}$$

T.e.m. $\underset{\sim}{E}''_0$ și curentul de excitație corespunzător, conform relațiilor (1.191 e) rezultă

$$\underset{\sim}{E}''_{0(1)} = \underset{\sim}{E}_{0s(1)} \frac{\underset{\sim}{E}'_{0(1)}}{\underset{\sim}{E}_{1(1)}} = 1{,}48\,\frac{1{,}14}{1{,}04} = 1{,}62 \text{ u.r.}$$

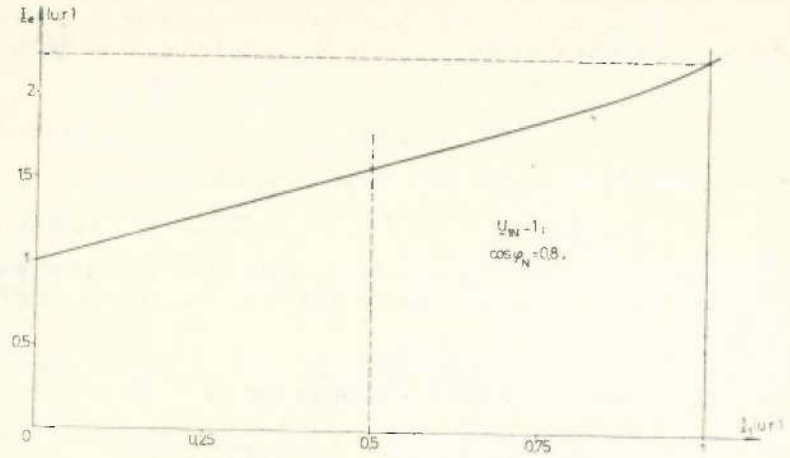


Fig. 2.15 — Caracteristica de reglaj a generatorului sincron cu poli înecați de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min.

și deci

$$\underset{\sim}{I}_{e(1)} = \underset{\sim}{I}_{e0} \frac{\underset{\sim}{E}''_{0(1)}}{\underset{\sim}{E}'_0} = 1 \cdot \frac{1{,}62}{1{,}042} = 1{,}55 \text{ u.r.} \qquad (2.271)$$

unde $\underset{\sim}{E}'_0 = 1{,}042$ u.r., este t.e.m. de pe caracteristica liniară, corespunzătoare tensiunii nominale $\underset{\sim}{U}_{1N} = 1$ u.r., de pe caracteristica reală (pentru $\underset{\sim}{I}_{e0} = 1$ u.r.).

Se procedează similar și pentru alte puncte, obținîndu-se caracteristica de reglaj reprezentată în figura 2.15, corespunzătoare tensiunii nominale și factorului de putere nominal.

PARTEA A DOUA

PROBLEME SPECIFICE PRIVIND RECALCULAREA ȘI COMPORTAREA MAȘINILOR ELECTRICE

De multe ori, mai ales în exploatare, este necesară recalcularea unor mașini electrice existente, fie datorită faptului că înfășurarea statorului (sau rotorului) a fost complet distrusă și nu mai poate fi reconstituită, fie că se dorește modificarea unor date nominale ca : tensiune, turație etc.

Aceasta constituie așa-zisa proiectare inversă a mașinii, sau reproiectare, adică, pornind de la unele elemente constructive existente trebuie să se determine celelalte elemente de performanță ale mașinii.

Proiectarea în aceste situații sau reproiectarea păstrează, în principiu, regulile generale expuse în cazul proiectărilor normale ale mașinilor electrice ; se are însă în vedere faptul că, în cadrul unor ateliere de reparații, condițiile de realizare a acestora pot fi diferite de cele din întreprinderea constructoare în care au fost fabricate. Astfel, în general, este posibil a nu se dispune nici de materialele necesare reparării înfășurării cu aceleași calități ca cele inițiale și nici de aceleași tehnologii de execuție. De aceea, în aceste situații, se recomandă a se micșora puțin solicitările electromagnetice, recomandate în mod normal la proiectarea inițială a acestor mașini.

Situația proiectării inverse a unei mașini poate apărea chiar în întreprinderile constructoare de mașini electrice, atunci cînd se dorește ca pe scheletul unui miez magnetic existent să se execute o mașină nouă, cu alte date tehnice decît cele ale mașinii pentru care este destinat miezul magnetic respectiv.

Desfășurarea calculelor în cazul reproiectărilor, se face utilizînd aceleași relații ca în cazul proiectărilor normale, aplicate însă,

cum s-a menționat, în ordinea corespunzătoare situației existente Așadar, relațiile folosite vor fi cele indicate în cazul proiectării normale, în volumul corespunzător tipului de mașină considerat : mașini de curent continuu în vol. I, mașini asincrone și transformatoare în vol. II și mașini sincrone în volumul de față (vol. III).

Este prezentat de asemenea, în ultima parte, modul de determinare a căderii de tensiune la bornele generatorului sincron în cazul cuplării brusce a unei suprasarcini de curent, problemă deosebit de importantă pentru exploatare.

Capitolul 3

PROBLEME SPECIFICE DE REPROIECTARE ȘI DE CALCUL ALE MAȘINILOR ELECTRICE

Pentru mai multă claritate, în cele ce urmează, expunerea desfășurării acestor calcule se va face concomitent cu cîte un exemplu concret, considerat mai semnificativ.

3.1. PROBLEME DE MAȘINI DE CURENT CONTINUU

De regulă, la mașinile de curent continuu pot apărea, ca probleme de reproiectări, fie schimbări ale tipului de excitație pentru obținerea anumitor caracteristici, fie recalculări, pe o geometrie existentă, a performanțelor maxime ce se pot obține (puterea obținută pentru o tensiune și turație impusă).

3.1.1. SCHIMBĂRI ALE TIPULUI DE EXCITAȚIE

A. O mașină de curent continuu, cu excitație mixtă are următoarele date :

— Tensiunea nominală : $U_N = 220$ V ;
— Tensiunea de excitație : $U_e = 165$ V ;
— Curentul nominal : $I_N = 15$ A ;
— Curentul de excitație : $i_e = 0{,}5$ A ;
— Numărul de spire, pe pol, al înfășurării de excitație serie : $w_{es} = 8$;
— Numărul de spire, pe pol, al înfășurării derivație : $w_e = 1\,200$.

Să se modifice tipul excitației, astfel încît, pentru aceleași date nominale, excitația să fie numai derivație și numai serie (două variante).

Pentru aceste mașini de curent continuu se vor utiliza relațiile din vol. I.

În cazul considerat, solenația totală de excitație la sarcină nominală F_{eN}, era asigurată de suma solenațiilor celor două înfășurări de excitație : F_{ep}, pentru cea derivație și F_{es}, pentru cea serie (se consideră cazul cînd montajul este adițional), adică (vezi relația (4.52))

$$F_{eN} = F_{ep} + F_{es} \text{ [A]}, \tag{3.1}$$

în care :

$$F_{ep} = 2w_e i_e \text{ [A]} ;$$
$$F_{es} = \frac{2w_{es} I_a}{C_s} \text{ [A]}, \tag{3.1 a}$$

unde, curentul din indus

$$I_a = I_N \pm i_e \text{ [A]}$$

(+) — pentru generator ;
(−) — pentru motor.

În cazul de față, considerînd că mașina este generator și că înfășurarea serie are o singură cale de curent în paralel ($C_s = 1$) rezultă :

$$F_{ep} = 2 \cdot 1\,200 \cdot 0{,}5 = 1\,200 \text{ A} ;$$
$$F_{es} = 2 \cdot 8 \cdot 15{,}5 = 248 \text{ A}$$

și

$$F_{eN} = F_{ep} + F_{es} = 1\,200 + 248 = 1\,448 \text{ A}. \tag{3.2}$$

Această valoare a solenației totale de excitație la sarcină normală va trebui să fie asigurată, în noile condiții, fie numai de excitația derivație, fie numai de excitația serie.

Varianta întîi. Mașina va avea numai înfășurare de excitație derivație.

În acest caz se observă că diferența de solenație, corespunzătoare înfășurării serie se poate asigura pe două căi :

a) lăsînd înfășurarea derivație existentă căreia trebuie să i se mărească curentul de excitație la valoarea

$$i'_e = \frac{F_{eN}}{2w_e} = \frac{1\,448}{2 \cdot 1\,200} = 0{,}603 \text{ A} \tag{3.3}$$

ceea ce ar conduce la o creștere a densității de curent în conductorul înfășurării de excitație

$$J'_e = J_e \frac{i'_e}{i_e} = J_e \cdot \frac{0{,}603}{0{,}5} = 1{,}206\ J_e \tag{3.3 a}$$

adică cu circa 20%, caz în care încălzirea înfășurării de excitație ar putea depăși limita admisă ;

b) adăugînd pe pol un număr de spire suplimentar, de aceeași secțiune ca cea existentă, care să asigure solenația înfășurării serie, adică :

$$w'_e = \frac{F_{es}}{2i_e} = \frac{248}{2 \cdot 0{,}5} = 248 \text{ spire}. \tag{3.4}$$

În felul acesta, înfășurarea de excitație derivație va avea, în noua situație, un număr total de spire

$$w_{ep} = w_e + w'_e = 1\,200 + 248 = 1\,448 \text{ spire/pol}.$$

Pentru a asigura aceeași valoare a curentului de excitație, tensiunea de excitație, trebuie să crească la valoarea

$$U'_e = U_e \frac{w_{ep}}{w_e} = 165 \cdot \frac{1\,448}{1\,200} = 199 \text{ V}, \tag{3.5}$$

valoare care reprezintă cca. 90% din tensiunea nominală, ceea ce se poate admite.

Cum se vede, cea de a doua soluție este mai indicată ; prima soluție este însă mai simplă și presupune existența, din faza inițială de proiectare, a unei rezerve de încălzire corespunzătoare.

OBSERVAȚIE. Dacă tensiunea de excitație inițială (U_e = = 165 V) ar fi fost mai mare, ar fi apărut pericolul ca noua valoare a tensiunii de excitație U_e să nu mai poată fi asigurată, caz în care trebuia schimbată (mărită) și secțiunea conductorului înfășurării de excitație derivație în limitele spațiului existent. O creștere a tensiunii de excitație, în aceleași limite, apare necesară și în cazul primei soluții, deoarece crește curentul de excitație.

Varianta a doua. Mașina va avea numai înfășurare de excitație serie.

După cum se știe o asemenea mașină de curent continuu, se utilizează numai ca motor, în special în cazurile în care se cer cupluri mari la pornirea în sarcină (cazul tracțiunii electrice) ; utilizarea unei astfel de mașini ca generator de curent continuu, nu este indicată deoarece căderea de tensiune de la funcționarea în gol la funcționarea în sarcină, $\Delta U = 100\%$.

Solenația totală de excitație la sarcină nominală, dată de relația (3.2) trebuie să fie asigurată, în acest caz, numai de înfășurarea de excitație serie. Ca urmare, în locul înfășurării derivație, trebuie suplimentat numărul de spire al înfășurării serie cu valoarea

$$w'_{es} = \frac{F_{eD}}{2I_N} = \frac{1\,200}{2 \cdot 15} = 40 \text{ spire/pol}, \qquad (3.6)$$

(deoarece nu mai există înfășurare derivație $I_a = I_N$).

În felul acesta, înfășurarea de excitație serie va avea, în noua situație, un număr total de spire, cu aceeași secțiune a conductorului ca la înfășurarea serie existentă,

$$w_{es(tot)} = w_{es} + w'_{es} = 8 + 40 = 48 \text{ spire/pol}. \qquad (3.6\text{ a})$$

OBSERVAȚIE. Valoarea totală a solenației serie rezultă

$$F_{es} = 2w_{es(tot)}I_N = 2 \cdot 48 \cdot 15 = 1\,440 \text{ A}$$

adică ceva mai mică decît valoarea dată de relația (3.2), deoarece în noua situație prin cele 8 spire deja existente va trece tot curentul $I_N = 15$ A, nu $I_a = 15{,}5$ A, cît se considerase în cazul generatorului. Dealtfel, dacă mașina s-ar fi considerat de la început ca motor, atunci cu relația (3.1 a) ar fi rezultat o solenație F_{es} mai mică deoarece, pentru motor, $I_a = I_N - i_e$.

B. Un generator de curent continuu în construcție protejată (IP 23), de 90 kW, 110 V, 600 rot/min cu excitație derivație a devenit disponibil ca urmare a înlocuirii grupului convertizor de curent continuu din care făcea parte, printr-o sursă de redresare.

Apare însă necesară folosirea generatorului existent ca motor de curent continuu, într-o altă instalație, la turația nominală de 500 rot/min, cu reglajul turației pînă la $n_{max} = 700$ rot/min.

Ce modificări constructive sînt necesare a fi aduse generatorului și care vor fi datele nominale ale motorului: tensiunea nominală de alimentare și puterea nominală obținută.

Datele de excitație ale mașinii, ca generator sînt:

— curentul de excitație: $i_{eG} = 15$ A;

— tensiunea de excitație: $U_{eG} = 80$ V;

— numărul de spire pe pol la înfășurării de excitație: $w_e = 325$ (primele două date s-au citit pe eticheta mașinii, iar ultima — numărul de spire — s-a luat din fișa tehnică a generatorului solicitată de la fabrica constructoare).

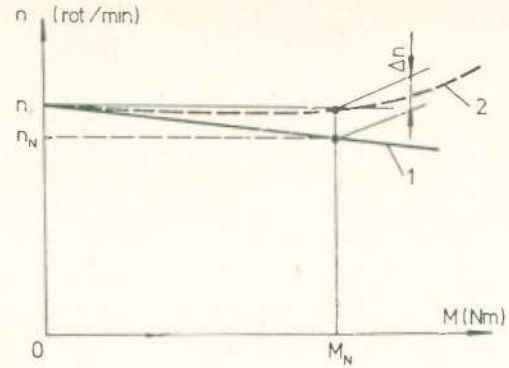


Fig. 3.1 — Forma caracteristicilor mecanice ale motorului de curent continuu cu excitație derivație.

Se știe că la funcționarea în regim de motor trebuie asigurată condiția necesară stabilității în funcționare a motorului; aceasta înseamnă că aliura caracteristicii mecanice $n = f(M)$ trebuie să fie puțin căzătoare (curba 1, fig. 3.1), astfel încît căderea de turație Δn, de la funcționarea în gol (n_0) la funcționarea în sarcină nominală (n_N) să aibă valoarea

$$\Delta n = n_0 - n_N = (0{,}1 \div 0{,}15)n_N. \qquad (3.7)$$

După cum rezultă, din expresia turației motorului de curent continuu

$$n_N = \frac{U_N - R_a I_{aN}}{k_e \Phi_N}, \qquad (3.7\text{ a})$$

căderea de turație Δn este dată de căderea de tensiune $R_a I_{aN}$ în ipoteza că fluxul util pe pol Φ_N, rămîne constant de la funcționarea în gol, la funcționarea în sarcină a motorului.

În realitate însă, în ultimul timp datorită claselor de izolație superioare folosite în construcția înfășurărilor mașinilor, au crescut considerabil solicitările electrice, în special pătura de curent și deci efectul demagnetizant al reacției transversale a indusului este mult mai puternic conducînd, în final, la o scădere a fluxului la funcționarea în sarcină, ceea ce are ca urmare o creștere a turației (curba 2, fig. 3.1), creștere care determină funcționări instabile ale motorului. De aceea trebuie luate măsuri de diminuare sau compensare a efectului demagnetizant al reacției indusului, măsuri care se pot lua prin trei metode.

Metoda 1. *Prin mărirea întrefierului δ de sub polii principali.* Mașina fiind însă deja construită este posibil ca la o mărire a întrefierului (impusă dealtfel și de reglajul turației), să nu mai facă față solenația de excitație. De aceea, mărirea întrefierului trebuie corelată și cu o suplimentare a solenației de excitație prin adăugarea, pe polii principali a unui număr de spire în înfășurarea de excitație derivație.

Această metodă este indicată în special la mașinile cu o reacție a indusului slabă, adică la mașinile de tip vechi cu clase inferioare de izolație (A sau B) sau pentru mașinile în construcție închisă la care solicitările electromagnetice sînt reduse.

În cazul de față mașina avînd clasa de izolație F (indicată pe etichetă) și tipul de protecție IP 23, nu se va aplica această metodă.

Metoda 2. *Prin prevederea, pe polii principali, a unei înfășurări de stabilizare a turației.* Această înfășurare se înseriază cu indusul motorul avînd, de fapt, o excitație mixtă în conexiune adițională.

Această metodă nu se poate aplica decît la motoarele cu un singur sens de rotație bine precizat, adică la motoarele ireversibile, deoarece la schimbarea sensului de rotație prin inversarea curentului de excitație, trebuie inversată și alimentarea înfășurării serie, lucru destul de dificil (cîmpul înfășurării serie trebuie să acționeze adițional cu al înfășurării derivație sau separate).

Considerînd că motorul are un singur sens de rotație și deci metoda se poate aplica, rezultă că, în acest caz, solenația totală de excitație la sarcină nominală F_{eN}, trebuie asigurată de solenațiile celor două înfășurări de excitație: derivație (sau paralelelă) F_{ep} și serie F_{es}, adică

$$F_{eN} = F_{ep} + F_{es} \text{ [A]}. \tag{3.8}$$

Pentru o funcționare rațională a motorului este indicat a se respecta aceleași solicitări electromagnetice (inducțiile, pătura de curent și densitățile de curent) ca ale generatorului. Aceasta înseamnă că motorul va trebui să aibă același curent, prin indus I_a și același flux util pe pol Φ_N, adică:

$$I_{aM} = I_{aG} = 833 \text{ A};$$
$$\Phi_{NM} = \Phi_{NG}, \tag{3.9}$$

în care:

— curentul din indusul generatorului este

$$I_{aG} = I_{NG} + i_r = \frac{P_{NG}}{U_{NG}} + i_r = \frac{90 \cdot 10^3}{110} + 15 = 833 \text{ A}; \tag{3.9 a}$$

— fluxul util pe pol al motorului

$$\Phi_{NM} = \frac{60\, E_M a}{pNn_{NM}}; \tag{3.9 b}$$

— fluxul util al generatorului

$$\Phi_{NG} = \frac{60 E_G a}{pNn_{NG}}. \tag{3.9 c}$$

Din egalitatea relațiilor (3.9 b) și (3.9 c) rezultă că t.e.m. a motorului trebuie să fie

$$E_M = E_G \frac{n_{NM}}{n_{NG}} = 121{,}4 \frac{500}{600} = 101{,}1 \text{ V} \tag{3.10}$$

în care, conform relației (4.3) din vol. I

$$E_G = U_N \frac{1+\eta}{2\eta} + \Delta U_{pe} = 110 \frac{1 + 0.86}{2 \cdot 0{,}86} + 2{,}5 = 121{,}4 \text{ V} \tag{3.10 a}$$

unde se consideră, atît pentru generator cît și pentru motor, din figura 4.1 (vol. I)

$$\eta = 0{,}86.$$

Aceasta înseamnă, că motorul va trebui să aibă tensiunea nominală de alimentare, pe baza relației (4.5)

$$U_{NM} = \frac{E_M + \Delta U_{pe}}{\frac{1+\eta}{2}} = \frac{2}{1+\eta}(E_M + \Delta U_{pe}) = \tag{3.11}$$
$$= \frac{2}{1 + 0{,}86}(101{,}1 + 2{,}5) = 111{,}3 \text{ V}.$$

După cum se vede, se poate considera ca tensiune nominală de alimentare a motorului valoarea

$$U_{NM} = 110 \text{ V}. \tag{3.11 a}$$

Pe baza relației (3.9), din care s-a dedus dealtfel și tensiunea nominală de alimentare a motorului, rezultă că solenația totală de excitație la sarcină nominală a motorului va fi aceeași ca a generatorului, adică

$$F_{eN} = 2w_e i_{eG} = 2 \cdot 325 \cdot 15 = 9\,750 \text{ A}. \tag{3.12}$$

Urmează, în continuare, să se determine solenația fiecărei înfășurări, pe baza relației (3.8) astfel încît, căderea de turație de la funcționarea în gol la funcționarea în sarcină nominală, să fie cea stabilită de relația (3.7), relație care indică faptul că la funcționarea în gol, turația n_0 a motorului este cu $10 \div 15\%$ mai mare decît la funcționarea în sarcină nominală, adică

$$n_0 = (1{,}1 \div 1{,}15) n_N = (1{,}1 \div 1{,}15)500 = 550 \div 575 \text{ rot/min.} \quad (3.13)$$

Pentru aceasta este necesară caracteristica magnetică la funcționarea în gol a mașinii

$$\Phi = f(\Sigma U_{mi}) \text{ sau } E = f(i_e).$$

Se observă că cel mai ușor se poate obține această caracteristică fie direct din buletinul de încercare experimentală, care însoțește fiecare mașină, fie, dacă nu se mai găsește, prin ridicarea din nou la un stand de probe a caracteristicii de funcționare în gol $E = f(i_e)$ (ca generator).

În cazul de față această caracteristică este inidcată în figura 3.2, pe abscisa căreia s-a luat nu i_e, ci $\Sigma U_{mi} = 2w_e i_e$.

Aceeași curbă reprezintă, la altă scară, și caracteristica

$$e_n = f(\Sigma U_{mi})$$

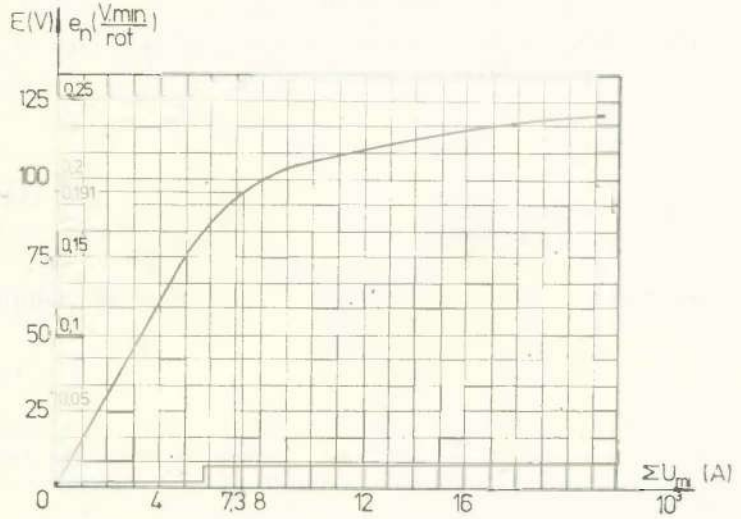


Fig. 3.2 — Caracteristică magnetică la funcționarea în gol a generatorului (și a motorului) de curent continuu.

în care :

$$e_n = \frac{E}{n_N} = \frac{E}{500} \left[\frac{\text{V min}}{\text{rot}}\right].$$

La funcționarea în gol

$$E_0 \approx U_N = 110 \text{ V}$$

astfel că rezultă

$$e_{n0} = \frac{E_0}{n_0} \approx \frac{U_N}{n_0} = \frac{110}{550 \div 575} = 0{,}191 \div 0{,}2 \frac{\text{V min}}{\text{rot}}. \quad (3.13\text{ a})$$

Pe caracteristica $e_n = f(\Sigma U_{mi})$ din figura 3.2, pentru aceste limite ale lui e_{n0}, rezultă limitele solenației de excitație la funcționarea în gol, care trebuie să fie asigurată de înfășurarea de excitație derivație (paralelă) sau separată

$$F_{ep(0)} = 7\,300 \div 8\,000 \text{ A.} \quad (3.14)$$

Înfășurării serie (de stabilizare) îi revine deci diferența din solenația totală dată de relația

$$F_{es(0)} = F_{eN} - F_{ep(0)} = 9\,750 - (7\,300 \div 8\,000) = \\ = 1\,750 \div 2\,450 \text{ A.} \quad (3.14\text{ a})$$

Numărul de spire al înfășurării serie, care revine pentru această solenație serie, este

$$w_{es(0)} = \frac{F_{es(0)}}{2I_a} = \frac{1\,750 \div 2\,450}{2 \cdot 833} = 1{,}05 \div 1{,}47. \quad (3.15)$$

Se recomandă a se lua pentru w_{es} numărul întreg cel mai apropiat de limitele rezultate (sau cel cuprins în aceste limite).

În cazul de față se observă că se poate lua

$$w_{es} = 1 \quad (3.15\text{ a})$$

ceea ce înseamnă că Δn va fi mai mic ca 10% din n_N, însă foarte apropiat de această valoare.

Solenația definitivă a înfășurării de excitație serie (de stabilizare) este

$$F_{es} = 2w_{es} I_a = 2 \cdot 1 \cdot 833 = 1\,666 \text{ A,} \quad (3.16)$$

iar a înfășurării de excitație derivație, pe baza relației (3.8)

$$F_{ep} = F_{eN} - F_{es} = 9\,750 - 1\,666 = 8\,084 \text{ A.} \quad (3.16\text{ a})$$

Curentul de excitație derivație, dacă se lasă aceleași bobine de excitație derivație (sau separată)

$$i_{eM} = \frac{F_{ep}}{2w_e} = \frac{8\,084}{2 \cdot 325} = 12{,}4 \text{ A}, \qquad (3.17)$$

adică mai mic decît al generatorului, ceea ce va conduce la o densitate de curent mai mică și o tensiune de excitație pentru motor mai mică

$$U_{eM} = U_{eG} \frac{i_{eM}}{i_{eG}} = 80 \frac{12{,}4}{15} = 66 \text{ V}. \qquad (3.17\text{ a})$$

Secțiunea conductorului înfășurării de excitație serie este

$$s_{Cus} = \frac{I_s}{J_s} = \frac{833}{4} = 208{,}25 \text{ mm}^2 \qquad (3.18)$$

în care s-a considerat densitatea de curent, în înfășurarea serie

$$J_s = 4 \text{ A/mm}^2.$$

Constructiv, înfășurarea serie de stabilizare a turației motorului se execută, în cazul de față al mașinii existente, relativ simplu, prin amplasarea peste înfășurarea derivație a cîte unei spire, cu secțiunea apropiată de cea rezultată din relația (3.18); înserierea spirelor va ține cont de polaritățile diferite ale polilor. Se pot folosi și cabluri (mai multe fire în paralel pentru realizarea secțiunii), înfășurate peste bobinele de excitație derivație (sau separată), respectîndu-se sensul adițional al celor două solenații.

La mașinile noi, proiectate inițial cu înfășurare serie de stabilizare a turației care se calculează identic ca în exemplul de față, aceasta se execută din bare îndoite pe muchie (cant) și plasate pe polii principali ca și înfășurarea serie a mașinilor cu excitație mixtă.

Se reamintește faptul că această metodă a stabilizării funcționării motorului de curent continuu cu înfășurare serie, se folosește numai în cazul cînd motorul are un singur sens de rotație, bine definit, cerut de utilajul antrenat.

Puterea nominală a motorului rezultă cu relația

$$P_N = \eta_1 P_1 = \eta_1 I_{NM} U_{NM} = 0{,}86 \cdot 845{,}4 \cdot 110 \approx 80 \text{ kW} \qquad (3.19)$$

în care, curentul nominal absorbit de motor este

$$I_{NM} = I_a + i_{eM} = 833 + 12{,}4 = 845{,}4 \text{ A}. \qquad (3.19\text{ a})$$

Reglajul turației, peste cea nominală, se face prin slăbirea fluxului, adică prin micșorarea curentului de excitație. Din punct de vedere mecanic este necesară întărirea bandajelor de consolidare a capetelor frontale ale înfășurării indusului (rotorului).

Metoda 3. *Prin utilizarea înfășurării de compensație.* Este metoda cea mai bună și indicată atunci cînd turația motorului variază într-o gamă largă de reglaj și este reversibilă, schimbarea sensului de rotație făcîndu-se, de regulă, prin inversarea sensului curentului de excitație.

După cum se știe, cîmpul înfășurării de compensație acționează adițional cu al polilor auxiliari și, împreună cu acesta, în sens contrar cîmpului de reacție transversală a indusului.

În cazul exemplului prezentat, această metodă implică schimbarea completă a statorului mașinii, ceea ce presupune o reproiectare și construcție nouă a acestuia, lucru care nu se poate face decît de o fabrică constructoare de mașini electrice, de preferat aceea care a fabricat generatorul.

În cele ce urmează, se prezintă numai metoda de recalculare a statorului, fără exemplificări numerice, luînd în considerație *influența existenței înfășurării de compensație* asupra dimensionării celorlalte părți componente ale acestuia (polii principali și auxiliari). Aceasta deoarece metoda este indicată și în cazul proiectării normale a mașinilor de curent continuu prevăzute cu înfășurare de compensație.

— Numărul de conductoare, pe pol, al înfășurării de compensație, conform relației (4.97), din vol. I (se consideră că fiecare conductor-bară — este plasat în cîte o crestătură, în talpa polului principal)

$$N_c = \alpha_p \frac{N}{4ap} = \text{număr întreg}, \qquad (3.20)$$

în care semnificația termenilor este cea din relația (4.97) din vol. I.

Din condiții de amplasare al acestor bare ale înfășurării de compensație în piesa polară, al căror număr se preferă, din motive tehnologice, să fie *număr întreg par*, se pot ivi două cazuri:

a) numărul real de bare amplasate în piesa polară, să fie egal sau foarte apropiat de cel calculat cu relația (3.20). În acest caz, gradul de compensare al mașinii este

$$\gamma = \frac{N_{c(\text{real})}}{N_{c(\text{calc})}} \approx 1 \text{ (sau } \approx 100\%); \qquad (3.21)$$

b) numărul real de bare amplsate în piesa polară, să fie mai mic decît cel calculat cu relația (3.20), în care caz, gradul de compensare este

$$\gamma = \frac{N_{c(\text{real})}}{N_{c(\text{calc})}} < 1 \text{ (sau } < 100\%). \qquad (3.21\ a)$$

Existența înfășurării de compensație, influențează calculul solenațiilor necesare la sarcină nominală atît a polilor principali F_{cN}, cît și a polilor auxiliari F_k.

— Astfel solenația totală de excitație la sarcină nominală, corespunzătoare unei perechi de poli, se determină tot cu relația (4.45) din vol. I, adică

$$F_{cN} = (1{,}05 \div 1{,}08)[U_{mE} + 2(F_{aq} + F_{ad})] \text{ [A]} \qquad (3.22)$$

în care însă, solenația corespunzătoare reacției transversale a indusului F_{aq}, nu se mai determină cu relația (4.47) din vol. I, ci cu relația

$$F_{aq} \approx \frac{1}{6} \frac{\Delta B_1 - \Delta B_2}{\Delta B_1 + \Delta B_2} b_i A(1 - \gamma) \text{ [A]}, \qquad (3.22\ a)$$

unde semnificațiile termenilor sînt aceleași ca în relațiile (4.45) și respectiv (4.47) din vol. I.

După cum se observă, în cazul particular cînd gradul de compensare $\gamma = 1$ (adică mașina este compesantă 100%), atunci $F_{aq} \approx 0$.

— Solenația totală a înfășurării polului auxiliar, pentru o pereche de poli, se determină tot cu relația (4.90) din vol. I, adică

$$F_k = \Sigma U_{mik} + F_{ak} \text{ [A]} \qquad (3.23)$$

în care însă, solenația de reacție a indusului F_{ak}, se determină cu relația

$$F_{ak} = \tau A - N_{c(\text{real})} I_a \text{ [A]} \qquad (3.23\ a)$$

în care, ca și în relația (3.20) s-a considerat că numărul de căi în paralel ale înfășurării de compensație $C_c = 1$, adică barele înfășurării de compensație sînt înseriate normal. În cazul în care se dorește ca $C_c > 1$, se reconsideră atît relația (3.20) cît și relația (3.23 a), adică:

$$N_c = \alpha_p \frac{NC_c}{4ap}; F_{ak} = \tau A - \frac{N_{c(\text{real})} I_a}{C_c}. \qquad (3.24)$$

După cum se observă, în cazul particular cînd gradul de compensare $\gamma = 1$ (adică mașina este compensată 100%), atunci

$$N_{c(\text{real})} I_a = b_p A \qquad (3.25)$$

ceea ce însemnează că înfășurarea de compensație compensează întreaga reacție a indusului pe deschiderea piesei polare b_p, iar relația (3.23 a) devine

$$F_{ak} = \tau A - b_p A = (\tau - b_i)A \text{ [A]}, \qquad (3.25\ a)$$

relație identică cu cea menționată în relațiile (4.91) din vol. I.

Semnificațiile celorlalți termeni din relațiile (3.23), (3.24) și (3.25) sînt aceleași ca în relațiile (4.90) și (4.91) din vol. I.

OBSERVAȚIE. Datorită existenței înfășurării de compensație gradul de deformare a cîmpului principal de către cîmpul de reacție a indusului este redus, astfel că repartiția potențialului pe periferia colectorului este mult mai uniformă.

Ca urmare, limitele tensiunii dintre două lamele consecutive

$$U_k = \frac{2pU_N}{K}$$

pot fi mărite de la 15÷16 V (la mașina fără înfășurare de compensație), pînă la 20 V.

Rezultă deci că prezența înfășurării de compensație îmbunătățește mult condițiile de comutație ale mașinii.

3.1.2. RECALCULĂRI ALE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU

Unei mașini de curent continuu sosită pentru reparat, îi lipsește înfășurarea rotorului (a fost scoasă în alte împrejurări). Statorul este însă în stare bună. Eticheta mașinii lipsește, dar se știe că mașina funcționa, ca motor, la o tensiune de alimentare de 120 V și antrena un mecanism la 1 000 rot/min.

Se cere să se stabilească înfășurarea rotorului și puterea nominală ce se poate obține tot ca motor și tot la $U_N = 120$ V și $n_N = 1\,000$ rot/min.

Tipul de protecție al mașinii corespunde simbolizării IP 23.

Se examinează miezul magnetic al rotorului și se constată că este în stare bună, desfacerea înfășurării deci nu i-a afectat calitatea.

De asemenea tot în stare bună se prezintă și colectorul, din a cărui construcție (după forma și dimensiunile steguleților) reiese că înfășurarea ar fi fost din bare.

Din măsurătorile efectuate rezultă următoarele date constructive :

— Diametrul rotorului : $D = 280$ mm ;

— Diametrul interior al rotorului : $D_{ir} = 130$ mm ;

— Lungimea pachetului de tole (miez compact) : $l_g = l_{Fe} = 200$ mm ;

— Numărul de crestături Z și de lamele ale colectorului K : $Z = K = 63$;

— Numărul de poli : $2p = 4$;

— Lățimea piesei polare a polului principal : $b_p = 150$ mm.

Piesa polară are întrefierul mărit spre cele două coarne polare, deci $\delta \neq$ constant.

— Dimensiunile crestăturii, conform figurii 3.3 (forma crestăturii s-a obținut prin copiere pe o hîrtie velină cu spatele creionului, pe partea frontală a miezului, de pe care s-au măsurat dimensiunile indicate în fig. 3.3).

— Calculul principalelor elemente necesare :

— pasul polar

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 28}{4} = 21{,}9 \text{ cm} ;$$

— pasul dentar

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 28}{63} = 1{,}39 \text{ cm} ;$$

— coeficientul de acoperire ideală a pasului polar

$$\alpha_i \approx \alpha_p = \frac{b_p}{\tau} = \frac{15}{21{,}9} = 0{,}685 \tag{3.26}$$

deoarece se consideră că prin teșirea marginilor pieselor polare, deci $\delta \neq$ constant, curba repartiției spațiale a inducției în întrefier se apropie de o sinusoidă.

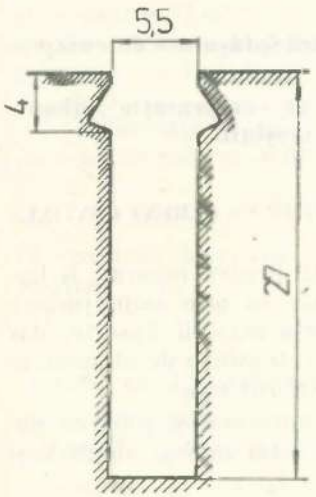


Fig. 3.3 — Forma și dimensiunile crestăturii rotorului mașinii de curent continuu (obținute prin copiere).

Pentru tipul de protecție indicat, din figura 4.6 (vol. I) rezultă următoarele solicitări electromagnetice, care ar trebui realizate :

$$A = 350 \div 400 \text{ A/cm} ; \tag{3.27}$$

$$B_\delta = 0{,}9 \div 0{,}95 \text{ T}.$$

După cum s-a menționat, în condițiile reparării mașinii, pentru o oarecare siguranță, valorile solicitărilor electromagnetice se mențin puțin sub limitele maxime admisibile. Din această cauză, deși se va utiliza, pentru înfășurare clasa de izolație F, valoarea păturii de curent rezultată din curbe nu se mai majorează cu $5 \div 8\%$, stabilindu-se deci, ca bună, valoarea

$$A = 360 \text{ A/cm}. \tag{3.27 a}$$

Deoarece înfășurarea este din bare, se consideră o singură spiră pe secție ($w_s = 1$) și rezultă :

— numărul total de conductoare

$$N = 2w_s K = 2 \cdot 1 \cdot 63 = 126 ;$$

— numărul de conductoare într-o crestătură

$$n_c = \frac{N}{Z} = \frac{126}{63} = 2.$$

Curentul dintr-o cale de curent, rezultă

$$i_a = \frac{A t_1}{n_c} = \frac{360 \cdot 1{,}39}{2} = 250{,}2 \text{ A}.$$

Determinarea secțiunii conductorului se face din dimensiunile crestăturii și anume (vezi fig. 3.3) :

— lățimea conductorului

$$b_{cond} = b_c - b_{iz} = 5{,}5 - 1{,}15 = 4{,}35 \text{ mm} ;$$

— înălțimea conductorului

$$h_{cond} = \frac{h_c - h_{iz}}{2} = \frac{27 - 6.7}{2} = 10{,}15 \text{ mm}$$

în care :

$b_{iz} = 1 \times 0{,}45 = 0{,}45$ mm — izolația E2S a conductorului ;

$+ 2 \times 0{,}25 = 0{,}5$ mm — izolația crestăturii din folie NMN ;

$+ \quad 0{,}2$ mm — joc

$b_{iz} = 1{,}15$ mm, este suma tuturor izolațiilor pe lățimea crestăturii, inclusiv jocul ;

$h_{iz} = 2 \times 0{,}45 = 0{,}9$ mm — izolația E2S a conductorilor ;
$+ 1 \times 0{,}2 = 0{,}2$ mm — izolația la baza crestăturii ;
$+ 3 \times 0{,}25 = 0{,}75$ mm — izolația crestăturii din folie NMN ;
$+ 2 \times 0{,}2 = 0{,}4$ mm — izolația între straturi (micanită flexibilă) ;
$+ 3 \times 0{,}15 = 0{,}45$ mm — izolație sub pană (folie de 0,15 mm) ;
4 mm — pana (3,5 mm) + istmul crestăturii (0,5 mm) ;

$h_{iz} = 6{,}70$ mm, este suma tuturor izolațiilor pe înălțimea crestăturii, inclusiv jocul, pana și istmul crestăturii.

Din STAS 2873-78 (anexa 5) se stabilește conductorul :

$$\text{Cu}Em\ 4{,}25 \times 10\ \text{PE2S} = 41{,}6\ \text{mm}^2,$$

diferențele de dimensiuni fiind incluse în jocurile respective, pe lățime și înălțime, care trebuiesc umplute cu folii izolante și lac de impregnare.

Verificarea densității de curent din înfășurarea indusului

$$J_a = \frac{i_a}{s_{Cu}} = \frac{250{,}2}{41{,}6} = 6{,}01\ \text{A/mm}^2. \tag{3.28}$$

În mod obișnuit pentru mașinile noi (proiectate inițial) și clasă de izolație F, limitele admisibile pentru densitatea de curent din indus

$$J_a = 5{,}5 \div 7{,}5\ \text{A/mm}^2.$$

Fiind la limita inferioară se mai poate crește puțin valoarea densității și recalcula apoi pătura de curent.

Astfel se impune (având $n_N = 1\,000$ rot/min)

$$J_a = 6{,}2\ \text{A/mm}^2 \tag{3.28 a}$$

și rezultă :

$$i_a = s_{Cu} J_a = 41{,}6 \cdot 6{,}2 = 257{,}9\ \text{A} ; \tag{3.29}$$

$$A = \frac{n_c i_a}{t_1} = \frac{2 \cdot 257{,}9}{1{,}39} = 371\ \text{A/cm}$$

adică în limitele admise, pentru o reparație.

Verificarea solicitărilor magnetice se face pornind de la valoarea fluxului util pe pol, dat de relația

$$\Phi = \frac{60Ea}{pNn_N}\ [\text{Wb}] \tag{3.30}$$

în care, numărul de perechi de căi de curent în paralel a, este necunoscut și trebuie determinat la o valoare pentru care inducțiile magnetice se încadrează în limitele admisibile.

Tensiunea electromotoare nominală E_N, pentru motor, conform relației (4.5) din vol. I

$$E_N = U_N \frac{1+\eta}{2} - \Delta U_{pc} = 120\ \frac{1+0{,}88}{2} - 2{,}5 = 110{,}3\ \text{V} \tag{3.30 a}$$

unde s-a estimat :

$\eta \approx 0{,}88$ din figura 4.1, pentru $P_N \approx 50$ kW (estimați) ;

$\Delta U_{pc} = 2{,}5$ V.

Astfel, pentru $a = 1$ se obține

$$\Phi = \frac{60Ea}{pNn_N} = \frac{60 \cdot 110{,}3 \cdot 1}{2 \cdot 126 \cdot 1\,000} = 2{,}62 \cdot 10^{-3}\ \text{Wb}, \tag{3.31}$$

pentru care rezultă inducția maximă în întrefier

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{2{,}62 \cdot 10^{-3}}{0{,}685 \cdot 0{,}219 \cdot 0{,}2} = 0{,}873\ \text{T} \tag{3.32}$$

valoare apropiată de limitele admisibile indicate de relația (3.27). Rezultă ca indicată înfășurarea cu $a = 1$, adică înfășurarea ondulată simplă.

Dacă inducția maximă în întrefier B_δ nu se încadra în limite, trebuia să se încerce înfășurarea cu $a = 2$; în orice caz din această verificare rezultă tipul de înfășurare indicat (în funcție de numărul perechilor de căi de curent în paralel a).

Verificarea, pentru înfășurarea ondulată simplă, a pasului rezultant

$$y = \frac{K-1}{p} = \frac{63-1}{2} = 31 = \text{număr întreg}, \tag{3.33}$$

deci înfășurarea se poate executa.

Pasul principal al înfășurării

$$y_1 = \frac{K}{2p} \mp \varepsilon = \frac{63}{4} - \frac{3}{4} = 15. \tag{3.33 a}$$

Deoarece numărul de crestături elementare într-o crestătură reală este

$$u = \frac{K}{Z} = 1,$$

rezultă că și $y_{1z} = y_1$.

Verificări necesare

— Tensiunea dintre două lamele consecutive, rezultă din relația (4.21) din vol. I

$$U_k = \frac{2pU_N}{K} = \frac{4 \cdot 120}{63} = 7{,}61 \text{ V} < 15 \text{ V}. \qquad (3.34)$$

— Inducția aparentă maximă, la baza dintelui rotorului, conform relației (4.28) din vol. I

$$B'_{d\max} = \frac{l_i l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_{d\min}} = \frac{1{,}39 \cdot 20 \cdot 0{,}873}{0{,}95 \cdot 20 \cdot 0{,}576} = 2{,}21 \text{ T} < 2{,}3 \text{ T} \qquad (3.35)$$

în care, lățimea minimă a dintelui rotorului este

$$b_{d\min} = \frac{\pi(D - 2h_c)}{Z} - b_c = \frac{\pi(28 - 2 \cdot 2{,}7)}{63} - 0{,}55 = 0{,}576 \text{ cm}.$$

— Inducția maximă în jugul rotorului, conform relației (4.30 a)

$$B_{ja} = \frac{\Phi}{2k_{Fe} l_{Fe} h_{ja}} = \frac{2{,}62 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}048} = 1{,}43 \text{ T} < 1{,}5 \text{ T} \qquad (3.36)$$

în care, înălțimea jugului rotor este

$$h_{ja} = \frac{D - (D_r + 2h_c)}{2} = \frac{28 - (13 + 2 \cdot 2{,}7)}{2} = 4{,}8 \text{ cm}.$$

În concluzie, rezultă că trebuie folosită înfășurarea cu următoarele caracteristici:

— înfășurare ondulată simplă, care are $a = 1$;

— $y = \frac{K - 1}{p} = 31$;

— $y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = 15$;

— $w_s = 1$;

— $u = 1$;

— $n_c = 2$.

Puterea nominală a mașinii, ca motor, rezultă din relațiile (4.2) și (4.8) din vol. I, care dau puterea interioară P_i, sub două forme și anume

$$P_i = EI_a \approx \frac{1 + \eta_i}{2\eta_i} P_N \qquad (3.37)$$

în care, curentul total din indus

$$I_a = 2ai_a = 2 \cdot 1 \cdot 257{,}9 = 515{,}8 \text{ A}, \qquad (3.37 \text{ a})$$

iar randamentul η_i a fost estimat mai sus.

Rezultă astfel, puterea nominală (aproximativă)

$$P_N = \frac{2\eta_i}{1 + \eta_i} P_i = \frac{2\eta_i}{1 + \eta_i} EI_a = \frac{2 \cdot 0{,}88}{1 + 0{,}88} \cdot 110{,}3 \cdot 515{,}8 =$$

$$= 53\,261 \text{ W} \approx 53{,}2 \text{ kW}. \qquad (3.38)$$

OBSERVAȚII. 1. În mod normal, este necesară o recalculare a solenației de excitație la sarcină nominală și a valorii exacte a curentului de excitație, care se face similar ca la proiectarea inițială, însă utilizînd și datele constructive existente ale statorului.

2. Puterea nominală a mașinii se poate determina mai exact pe baza bilanțului energetic, ca motor, cu relația

$$P_N = P_i - (p_{Fe} + p_{m+v}) = EI_a - (p_{Fe} + p_{m+v}) \qquad (3.39)$$

în care, pierderile în fier p_{Fe} și pierderile mecanice și de ventilație p_{m+v}, se pot calcula pe baza relațiilor cunoscute de la cap. 6 din vol. I.

3.2. PROBLEME DE MAȘINI ASINCRONE

Este evident că se va avea în vedere mașina asincronă trifazată, ca motor, motoarele monofazate cu rotorul în scurtcircuit și cu colector, făcînd obiectul unor cazuri netratate în prezentul îndrumar.

Problemele mai deosebite de reproiectări ce pot apărea la aceste mașini sînt legate fie de lipsa înfășurării statorului cînd

se cunosc datele de pe etichetă, fie de schimbarea, pe o construcție existentă, a unor date nominale principale ca tensiunea de alimentare sau turația mașinii.

3.2.1. CALCULUL UNUI MOTOR ASINCRON ALE CĂRUI DATE PRINCIPALE SE CUNOSC (SE CUNOAȘTE ETICHETA). DAR LIPSEȘTE COMPLET ÎNFĂȘURAREA STATORULUI

a) Determinarea elementelor ce se pot cunoaște.

— *Datele de pe etichetă*

$P_N = - - - -$ kW; $U_N = - - -$ V; $I_N = - -$ A;
$n_N = - - - -$ rot/min; $\cos \varphi = - - -$; $f_1 = - -$ Hz;
$U_2 = - - - -$ V; $I_2 = - - - -$ A (pentru rotorul bobinat);

Protecție: I P — — —; Clasa de izolație — — —.

— *Datele extrase din măsurători*

Dimensiunile miezului magnetic (fig. 3.4 și fig. 1.8)

$D_e = - - - -$ mm; $D = - - -$ mm;
$l_g = - - - -$ mm; $l_1 = - - -$ mm;
$b_r = - - -$ mm; $n_c = - - -$;

Crestăturile statorului: $Z_1 = - - - -$; forma și dimensiunile crestăturii, conform uneia din variantele prezentate în figura 1.11 sau figura 1.12.

În cazul crestăturilor ovale sau trapezoidale, cînd dinții au pereții paraleli, se măsoară și lățimea dintelui b_d (vezi fig. 1.11 a, b și fig. 3.4).

După cum s-a menționat, determinarea dimensiunilor exacte ale crestăturilor se face și prin copiere, adică prin așezarea unei hîrtii veline pe fața frontală a miezului magnetic și apăsarea peste hîrtie cu spatele creionului pe întregul contur al crestăturii (vezi fig. 3.3 și fig. 3.5), pe care se măsoară apoi dimensiunile.

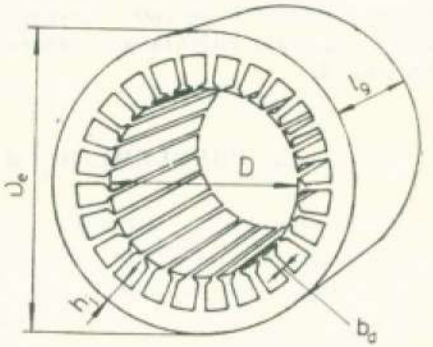


Fig. 3.4 — Miez magnetic statoric compact, fără înfășurare.

b) Efectuarea calculului electromagnetic și stabilirea înfășurării.

Deoarece mașina are geometria stabilită de către fabricant pentru datele tehnice scrise pe etichetă, calculul electromagnetic (reproiectarea) are rolul de a stabili acea înfășurare statorică, care să asigure verificarea încadrării în limitele admise, pentru aceste situații, a solicitărilor electromagnetice, cazuri în care, în general, și valorile celorlalte mărimi (parametrii și caracteristici) se vor încadra în limitele obișnuite admise.

După cum s-a procedat și anterior, pentru o mai ușoară înțelegere, desfășurarea calculelor se va face pe un exemplu concret.

Se va considera astfel cazul real al unui *motor asincron cu rotorul în scurtcircuit* cu următoarele date:

— *datele de pe etichetă.*

$P_N = 11$ kW; $U_N = 380$ V (conexiune Δ); $I_{N1} = 22{,}5$ A;
$n_N = 1435$ rot/min; $\cos \varphi = 0{,}85$; $f_1 = 50$ Hz;
$U_2 = ... $ V; $I_2 = ... $ A;

Protecție: IP 23; clasă de izolație F.

— *datele extrase din măsurători*

Miezul magnetic statoric este de forma indicată în figura 3.4, însă cu crestături ovale.

$D_e = 259$ mm; $D = 165$ mm; $l_g = l_{Fe} = 120$ mm.

Mașina are miez magnetic compact și deci $l_i \approx l_g = 120$ mm.

Crestăturile statorului: $Z_1 = 36$; forma și dimensiunile crestăturii (obținute prin copiere) conform figurii 3.5.

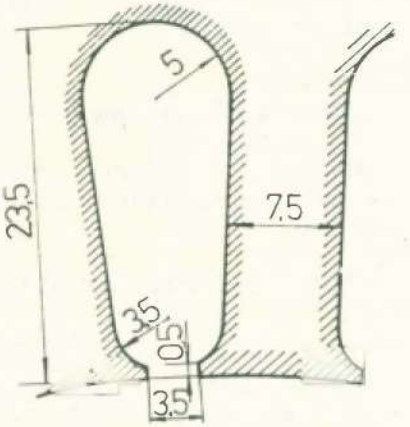


Fig. 3.5 — Forma și dimensiunile crestăturii motorului asincron de 11 kW (obținute prin copiere).

Deoarece dinții sînt cu pereții paraleli, se măsoară pe figura 3.5 și grosimea dintelui, $b_d = 7{,}5$ mm.

Rotorul este în scurtcircuit avînd $Z_2 = 44$ crestături.

Mersul calculului și relațiile folosite sînt conform vol. II.

— Numărul de perechi de poli, conform relației (1.1), din vol. II

$$p = \frac{60 f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1\,500} = 2 \qquad (3.40)$$

în care, pentru $n_N = 1\,435$ rot/min, revine $n_1 = 1\,500$ rot/min.

— Pasul polar $\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 165}{2 \cdot 2} = 130$ mm $= 13$ cm. (3.41)

— Pasul dentar, al statorului

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 165}{36} = 14{,}4 \text{ mm} = 1{,}44 \text{ cm}. \quad (3.42)$$

— Fluxul util, pe pol, determinat din condițiile respectării solicitărilor magnetice, conform relației (1.12) din vol. II

$$\Phi = \alpha_i \tau l_i B_\delta = 0{,}7 \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}72 = 7{,}86 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.43)$$

în care :

— din figura 1.11 (vol. II), pentru $\tau = 13$ cm și $p = 2$ se obțin :

$$A = 300 \div 320 \text{ A/cm} ; \quad B_\delta = 0{,}72 \text{ T} ; \quad (3.43 \text{ a})$$

— din figura 1.7 (vol. II), pentru valoarea obișnuită a coeficientului de saturație magnetică parțială $k_{sd} = 1{,}25$ rezultă :

$$\alpha_i = 0{,}7 ; \quad k_B = 1{,}095. \quad (3.43 \text{ b})$$

— Verificarea (orientativă) a inducției în jugul statorului, conform relației (1.42) din vol. II

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 k_{Fe} l_{Fe} h'_{j1}} = \frac{7{,}86 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}0235} = 1{,}47 \text{ T} \quad (3.44)$$

în care :

$k_{Fe} = 0{,}95$ — coeficientul de umplere al miezului magnetic ;
$l_{Fe} = l_g = 12$ cm $= 0{,}12$ m ;
h'_{j1} — înălțimea de calcul a jugului stator, care conform relației (1.42 a) din vol. II, deoarece nu există canale axiale de ventilație

$$h'_{j1} = h_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{c1} = \frac{259 - 165}{2} - 23{,}5 = 23{,}5 \text{ mm} = 0{,}0235 \text{ m}. \quad (3.44 \text{ a})$$

După cum se vede, valoarea inducției maxime în jugul statorului se încadrează în limitele indicate în paragraful 1.4.2 B, din vol. II, conform căruia

$$B_{j1} = 1{,}35 \div 1{,}55 \text{ T}. \quad (3.44 \text{ b})$$

Verificarea (orientativă) a inducției aparente în dinții statorului (cu pereții paraleli), se face pe baza relației (1.38) din vol. II

$$B'_d = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_d} = \frac{1{,}44 \cdot 12 \cdot 0{,}72}{0{,}95 \cdot 12 \cdot 0{,}75} = 1{,}46 \text{ T}, \quad (3.45)$$

valoare care se încadrează în limitele indicate în pargraful 1.4.2 B, conform căruia, pentru dinți cu pereții paraleli

$$B'_d = 1{,}4 \div 1{,}7 \text{ T}.$$

Fiind verificate inducțiile în miezul magnetic statoric, rezultă că, de regulă, vor corespunde și valorile inducțiilor în miezul magnetic rotoric, aceasta deoarece se are în vedere faptul că mașina a fost corect dimensionată inițial de întreprinderea constructoare.

De asemenea, deoarece verificările orientative, se încadrează foarte bine în limitele indicate, se va avea în vedere faptul ca fluxul util definitiv (determinat din numărul de spire pe fază) să aibă aceeași valoare, sau apropiată, de cea dată de relația (3.43).

În aceste condiții se poate trece la calculul înfășurării statorului.

Mașina fiind de putere mică se va utiliza o înfășurare din sîrmă (conductor rotund) în două straturi, cu capetele de bobină semirotunde așa cum se indică în figura 1.42, din vol. II și în figura 1.20. Conductorul va fi izolat cu email tereftalic, în clasă de izolație F.

— Numărul de spire, pe fază, conform relației (1.31) din volumul II

$$w_1 = \frac{k_E U_1}{4 k_B f_1 k_{w1} \Phi} = \frac{0{,}97 \cdot 380}{4 \cdot 1{,}095 \cdot 50 \cdot 0{,}945 \cdot 7{,}86 \cdot 10^{-3}} = 227 \quad (3.46)$$

în care :

$U_1 = U_N = 380$ V, deoarece conexiunea este triunghi (Δ) ;
$k_E = 0{,}97$ — din figura 1.6 (vol. II), pentru $p = 2$;
$k_{w1} = 0{,}945$ — din anexa 1, tabelul 1-I, pentru :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3 ;$$

$$y_1 \approx \frac{5}{6} y_\tau = \frac{5}{6} m_1 q_1 = \frac{5}{6} \cdot 3 \cdot 3 = 7{,}5 \Rightarrow y_1 = 8 = \text{număr întreg}$$

deoarece pasul principal y_1 trebuie să fie număr întreg.

Pasul înfășurării se mai poate scrie (pentru $y_1 = 8$) și sub forma

$$y_1 = 1 - 9,$$

care reprezintă crestăturile în care se găsesc cele două laturi ale bobinei (1 — de ducere, 9 — de întoarcere).

— Numărul de conductoare efective, dintr-o crestătură, conform relației (1.32) din vol. II

$$n_{c1} = \frac{2m_1a_1w_1}{Z_1} = \frac{2\cdot3\cdot1\cdot227}{36} = 37{,}83 \qquad (3.47)$$

în care s-a luat o singură cale de curent în paralel pe fază ($a_1 = 1$), deoarece curentul pe fază este mic.

Se ia $n_{c1} = 38$, (3.47 a)

ceea ce înseamnă că înfășurarea va avea bobine egale (19 spire pe bobină).

Se recalculează, ca valori definitive :

— numărul de spire pe faz

$$w_1 = \frac{Z_1n_{c1}}{2m_1a_1} = \frac{36\cdot38}{2\cdot3\cdot1} = 228\,; \qquad (3.48)$$

— fluxul util, pe pol, conform relației (1.35 a) din vol. II

$$\Phi = \frac{k_EU_1}{4\,k_R f_1 w_1 k_{w1}} = \frac{0{,}97\cdot380}{4\cdot1{,}095\cdot50\cdot228\cdot0{,}945} = 7{,}81\cdot10^{-3}\ \text{Wb}$$

valoare apropiată de cea estimată de relația (3.43) așa cum se anticipase, ceea ce înseamnă că inducțiile calculate sînt bune.

Diametrul conductorului izolat, rezultă din relația (2.39), din vol. II,

$$d_{iz} = \sqrt{\frac{k_u S'_{cr}}{n_{tot}}} = \sqrt{\frac{0{,}7\cdot191}{38}} = 1{,}87\ \text{mm} \qquad (3.49)$$

în care :

$n_{tot} = n_{c1}n_f = n_{c1}$, deoarece nu sînt fire în paralel ($n_f = 1$);

$k_u \approx 0{,}7$ — coeficientul de umplere a crestăturii ;

S'_{cr} — secțiunea netă a crestăturii, fără pană și istm, neincluzînd nici grosimea izolației crestăturii (din 2 folii NMN, gros 0,22 mm fiecare, ceea ce înseamnă cca. 0,5 mm unilateral), nici grosimea penei de 2,5 mm și istmului crestăturii de 0,5 mm (secțiunea ocupată de pană se apreciază acoperitor la valoarea $2{,}5 \times 5 = 12{,}5$ mm²).

Rezultă deci, pentru dimensiunile din figura 3.5

$$S'_{cr} = \pi(5 - 0{,}5)^2 + \frac{(10-1)+(7-1)}{2}\cdot15 + \pi(3.5 - 0{,}5)^2 - 12{,}5 \approx 191\ \text{mm}^2. \qquad (3.49\ a)$$

Admițînd că grosimea bilaterală a emailului tereftalic (conform anexei 6)este cca. 0,1 mm, rezultă diametrul conductorului din cupru, neizolat

$$d = 1{,}77\ \text{mm}. \qquad (3.49\ b)$$

Din STAS 685-75 (anexa 4) se alege conductorul

$$\text{Cu}Em\ \Phi\ 1{,}7\ \text{ET} = 2{,}27\ \text{mm}^2. \qquad (3.49\ c)$$

Este obligatorie verificarea posibilității bobinării mașinii adică a posibilității introducerii, fir cu fir, a conductorului izolat în crestătură.

Pentru aceasta trebuie satisfăcută relația

$$a_s \geqslant d_{iz} + 1{,}5\ \text{mm} = 1{,}8 + 1{,}5 = 3{,}3\ \text{mm}. \qquad (3.50)$$

Cum $a_s = 3{,}5$ mm (vezi fig. 3.5), rezultă că mașina se poate bobina cu conductorul stabilit.

Dacă relația (3.50) de mai sus, nu s-ar fi respectat, atunci se luau două fire în paralel ($n_f = 2$), pentru care rezulta un diametru al conductorului mai mic.

Verificarea solicitărilor electrice

— Pătura de curent, conform relației (1.34) din vol. II

$$A = \frac{n_{c1}I_N}{a_1t_1} = \frac{38\cdot13}{1\cdot1{,}44} = 343\ \text{A/cm} \qquad (3.51)$$

în care, curentul nominal pe fază, pentru conexiunea triunghi a înfășurării statorului, rezultă din curentul nominal de linie I_{Nl} înscris pe eticheta motorului, cu relația

$$I_N = \frac{I_{Nl}}{\sqrt{3}} = \frac{22{,}5}{\sqrt{3}} \approx 13\ \text{A}. \qquad (3.51\ a)$$

După cum se observă, pătura de curent este cu cca. 7% mai mare decît limitele indicate de relația (3.43 a), ceea ce pentru o reparație este cam mult. Dacă s-ar micșora n_{c1}, atunci ar crește fluxul și deci solicitările magnetice ar depăși limitele.

De aceea, se consideră, pentru A, valoarea obținută cu relația (3.51) avînd însă grijă ca densitatea de curent să fie spre limita inferioară (deoarece încălzirea mașinii este dată de produsul AJ_1).

— Densitatea de curent, conform relației (1.44), din vol. II

$$J_1 = \frac{I_N}{a_1s_{Cu1}} = \frac{13}{1\cdot2{,}27} = 5{,}72\ \text{A/mm}^2 \qquad (3.52)$$

valoare, apropiată de limita inferioară indicată în paragraful 1.4.1 A, din vol. II, conform căruia

$$J_1 = 5{,}5 \div 7{,}5 \text{ A/mm}^2,$$

așa cum, de altfel, trebuia.

Rezultă deci, că înfășurarea statorului este bine dimensionată.

Deoarece rotorul este în scurtcircuit, asupra înfășurării rotorului, în afara unei verificări atente ca nu cumva să prezinte unele defecțiuni, nu mai este nimic de făcut, aceasta încadrîndu-se în mod automat în solicitările normale ale mașinii.

Este însă necesar a se verifica dacă numărul de crestături ale rotorului Z_2 se încadrează în recomandările indicate de tabelul 1.4 din vol. II, deoarece există riscul apariției zgomotelor și cuplurilor parazite.

În cazul de față $Z_2 = 44$, se încadrează în recomandări (pentru $2p = 4$ și $Z_1 = 36$).

OBSERVAȚIE. Dacă motorul este cu rotorul bobinat, iar înfășurarea rotorului lipsește, atunci la stabilirea acesteia se pornește de la respectarea lui U_2 și I_2, înscrise pe etichetă (tensiunea U_2 de pe etichetă este, de regulă cea dintre inele, care este de $\sqrt{3}$ ori mai mare ca tensiunea de fază a rotorului U_{20}).

Ca indicație, rezultă că se poate proceda astfel :

— se determină, tensiunea pe fază

$$U_{20} = \frac{U_2}{\sqrt{3}}; \tag{3.53}$$

— se stabilesc : Z_2, apoi $q_2 = \frac{Z_2}{2pm_2}$ (care trebuie să fie număr întreg, cel mult fracționar însă fracția să fie 0,5) și pasul principal $y_{1(\text{rot})} = \frac{Z_2}{2p} = m_2 q_2$ (de regulă diametral), pentru care, din anexa 1, rezultă k_{w2} ;

— din relația (1.48) din vol. II :

$$E_2 \approx U_{20} = k_E U_1 \frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_{w1}} \tag{3.53 a}$$

rezultă w_2, apoi (pentru a_2 ales)

$$n_{c2} = \frac{2m_2 a_2 w_2}{Z_2} = \text{număr întreg (de preferat par) ;}$$

— pentru I_2 și dimensiunile crestăturii, rezultă conductorul înfășurării și densitatea de curent J_2 din rotor.

Aceste calcule sumare sînt, în general, suficiente pentru refacerea (sau rebobinarea) mașinii.

Dacă se dorește a se executa calculele complete (parametrii și caracteristicile) atunci se procedează ca la proiectarea normală (vezi vol. II).

3.2.2. CALCULUL UNUI MOTOR ASINCRON CÎND SE CERE SCHIMBAREA TENSIUNII ÎNFĂȘURĂRII STATORICE

Se va prelua exemplul precedent la care urmează a se schimba tensiunea de alimentare la 220/380 V (adică $U_N = 380$ V, în conexiune Y), în loc de 380/660 V (adică $U_N = 380$ V, dar în conexiune Δ).

Se pot ivi două cazuri :

a) înfășurarea statorului este complet distrusă și nu se mai pot stabili caracteristicile constructive : numărul de spire, conductoarele etc.

Calculul electromagnetic se execută, în acest caz, identic cu cel din exemplul precedent de la paragraful 3.2.1, dar în care se înlocuiește tensiunea de fază de 380 V, cu cea de 220 V ;

b) înfășurarea statorului nu este distrusă, și i se pot deci stabili caracteristicile constructive : w_1, n_{c1}, y_1 și dimensiunile conductorului.

Calculul electromagnetic (recalcularea), se rezumă în acest caz, la stabilirea caracteristicilor noii înfășurări a statorului : w_1', n'_{c1} și dimensiunile conductorului.

La înfășurările repartizate în crestături care au $k_w \neq 1$, între t.e.m. și numărul de spire există relația

$$\frac{U_1}{U_1'} \approx \frac{E_1}{E_1'} = \frac{w_1 k_{w1}}{w_1' k_{w1}'} \tag{3.54}$$

unde, cu semnul (') s-au notat mărimile recalculate (ale noii înfășurări).

În asemenea situații, se alege pentru noua înfășurare același pas principal y_1 ca cel existent și deci

$$k_{w1} = k_{w1}'.$$

— Numărul de spire, pe fază, rezultă

$$w_1' = w_1 \frac{U_1'}{U_1} = 228 \frac{220}{380} \approx 132. \tag{3.55}$$

— Numărul de conductoare dintr-o crestătură, considerînd $a_1 = 1$

$$n'_{c1} = \frac{2m_1 a'_1 w'_1}{Z_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 132}{36} = 22 \text{ număr întreg par.} \qquad (3.55\ a)$$

— Diametrul izolat al conductorului (considerînd tot conductor rotund, deoarece crestătura este ovală) rezultă din condiția respectării aceluiași coeficient de umplere a crestăturii k_u.

Se poate scrie deci

$$n_{c1} d_{iz}^2 = n'_{c1} d'^2_{iz} \qquad (3.56)$$

de unde rezultă

$$d'_{iz} = d_{iz} \sqrt{\frac{n_{c1}}{n'_{c1}}} = 1{,}8 \sqrt{\frac{38}{22}} = 2{,}36 \text{ mm.} \qquad (3.56\ a)$$

Deoarece acest diametru nu intră în crestătură (nu este satisfăcută relația (3.50)). cît și datorită faptului că înfășurările care au diametrele conductoarelor mai mari de 2 mm, sînt mai greu de executat, se aleg două fire în paralel ($n'_f = 2$).

În acest caz, numărul total de conductoare în crestătură este

$$n'_{tot} = n'_{c1} n'_f = 22 \cdot 2 = 44 \qquad (3.57)$$

iar relația (3.56) devine

$$n_{c1} d_{iz}^2 = n'_{tot} d'^2_{iz} \qquad (3.58)$$

de unde rezultă diametrul izolat al unui fir

$$d'_{iz} = d_{iz} \sqrt{\frac{n_{c1}}{n'_{tot}}} = 1{,}8 \sqrt{\frac{38}{44}} = 1{,}67 \text{ mm.} \qquad (3.58\ a)$$

Pentru o grosime bilaterală a emailului tereftalic de cca. 0,07 mm, din STAS 685-75 (anexa 4) se alege conductorul *Cu Em* Φ 1,6 ET = 2,011 mm². (3.58 b)

3.2.3. CALCULUL UNUI MOTOR ASINCRON ÎN CAZUL CÎND SE CERE SCHIMBAREA TURAȚIEI

Această situație este mai dificilă deoarece între dimensiunile miezului magnetic, ale crestăturii și numărul de perechi de poli (sau turație) este o strînsă corelare. Din punct de vedere al inducțiilor în juguri, cel mai dezavantajos este cazul trecerii de la o turație mai mică la una mai mare.

Pentru exemplificare se alege mașina precedentă (de la paragraful 3.2.1) căreia se dorește a i se schimba turația de la $n_1 = 1\,500$ rot/min ($2p = 4$) la $n_1 = 3\,000$ rot/min ($2p = 2$).

— Verificarea numărului de crestături pe pol și fază q_1, care trebuie să respecte considerentele specificate la paragraful 1.5.1, din vol. II, dintre care cea mai importantă este ca q_1 să fie număr întreg.

În cazul de față

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1} = \frac{36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 6 = \text{număr întreg.} \qquad (3.59)$$

— Verificarea compatibilității numerelor de crestături ale statorului Z_1, ale rotorului Z_2 și numărului de poli $2p$, verificare care se face pe baza tabelului 1.4 din vol. II, care conține numărul de crestături recomandate pentru motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit.

Din acest tabel rezultă că $Z_1 = 36$ este compatibil cu $Z_2 = 44$ atît la $2p = 4$ (1 500 rot/min) cît și la $2p = 2$ (3 000 rot/min).

Fiind îndeplinite cele două condiții de bază, se poate trece la calculul electromagnetic și dimensionarea înfășurării statorului, folosind dimensiunile geometrice de la exemplul precedent din paragraful 3.2.1.

— Numărul de perechi de poli

$$p = \frac{60 f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{3\,000} = 1. \qquad (3.60)$$

— Pasul polar

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 165}{2 \cdot 1} \approx 260 \text{ mm} = 26 \text{ cm.} \qquad (3.61)$$

— Fluxul util, pe pol. La prima vedere s-ar părea că determinarea fluxului util pe pol se poate face, ca și în cazul precedent, cu relația (3.43), adică din condiția respectării inducției magnetice în întrefier B_δ. Dar, după cum se observă din comparația relațiilor (3.61) și (3.41), în noua situație pasul polar τ s-a dublat, ceea ce conduce (pentru aproximativ aceeași valoare a inducției B_δ) la un flux util pe pol, dublu. Aceasta înseamnă că pentru solicitări magnetice normale în întrefier și în dinți, vor rezulta inducții magnetice duble în juguri, ceea ce nu se poate.

De aceea la trecerea de la o turație mai mică, la o turație mai mare, se forțează puțin peste limitele superioare solicitările mag-

netice în juguri, de la care se pornește în determinarea fluxului util polar, în condițiile în care solicitările magnetice ale dinților și întrefierului sînt sub limitele normale.

Creșterea inducțiilor în juguri cu cca. 10% peste limitele admisibile, conduce la creșterea pierderilor în fierul jugurilor și deci la o încălzire mai mare a acestora ; o parte din căldură este însă preluată de dinți, în care pierderile scad considerabil.

Fluxul util pe pol, se determină deci din relația (1.42) din vol. II (vezi și relația (3.44))

$$\Phi = 2k_{Fe}l_{Fe}h'_{j1}B_{j1} = 2\cdot0{,}95\cdot0{,}12\cdot0{,}0235\cdot1{,}7 = \\ = 9{,}1\cdot10^{-3}\ \text{Wb} \qquad (3.62)$$

în care :

$B_{j1} = 1{,}7$ T, cu circa 10% mai mare decît limita maximă indicată (vezi relația (3.44 b)).

Deoarece inducțiile în întrefier și în dinți vor fi mult sublimitele normale, va scădea factorul de saturație magnetică parțială.

Se alege deci $k_{sd} \approx 1{,}1$ pentru care, din figura 1.7, din vol. II rezultă :

$$\alpha_i \approx 0{,}67\ ; \qquad (3.63)$$

$$k_B = 1{,}1.$$

— Inducția maximă în întrefier

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \tau l_i} = \frac{9{,}1\cdot10^{-3}}{0{,}67\cdot0{,}26\cdot0{,}12} = 0{,}435\ \text{T}. \qquad (3.64)$$

— Inducția aparentă în dinții statorului

$$B'_d = \frac{t_1 l_i B_\delta}{k_{Fe} l_{Fe} b_d} = \frac{1{,}44\cdot12\cdot0{,}435}{0{,}95\cdot12\cdot0{,}75} = 0{,}88\ \text{T}. \qquad (3.65)$$

Înfășurarea se execută tot cu conductor rotund (din sîrmă) avînd pasul

$$y_1 \approx \frac{5}{6}y_\tau = \frac{5}{6}m_1 q_1 = \frac{5}{6}\cdot3\cdot6 = 15 \qquad (3.66)$$

adică

$$y_1 = 1 - 16$$

pentru care, din anexa 1 (tabelul 1-I) rezultă

$$k_{w1} = 0{,}925. \qquad (3.66\ \text{a})$$

La mașinile mari și în special la înaltă tensiune, din motive tehnologice (o bobinare mai ușoară), se folosește o scurtare a pasului chiar pînă la $\frac{1}{3}y_\tau$, cu dezavantajul unui factor de înfășurare scăzut.

— Numărul de spire pe fază

$$w_1 = \frac{k_E U_1}{4k_f f_1 k_{w1}\Phi} = \frac{0{,}975\cdot380}{4\cdot1{,}1\cdot50\cdot0{,}925\cdot9{,}1\cdot10^{-3}} = 200 \qquad (3.67)$$

în care :

$k_E = 0{,}975$ — din figura 1.6 (vol. II), pentru $p = 1$.

— Numărul de conductoare în crestătură

$$n_{c1} = \frac{2m_1 a_1 w_1}{Z_1} = \frac{2\cdot3\cdot1\cdot200}{36} = 33{,}3.$$

Se ia

$$n_{c1} = 34,$$

pentru care rezultă

$$w_1 = \frac{Z_1 n_{c1}}{2m_1 a_1} = \frac{36\cdot34}{2\cdot3\cdot1} = 204. \qquad (3.67\ \text{a})$$

Ca urmare, prin recalculare, scad (cu raportul 200/204) : Φ, B_δ, B'_d și B_{j1}.

Solicitările electrice

— Pătura de curent se stabilește la valoarea rezultată din figura 1.11 (vol. II) pentru $\tau = 26$ cm și $p = 1$ și anume

$$A = 380\ \text{A/cm}. \qquad (3.68)$$

— Curentul nominal, pe fază

$$I_N = \frac{a_1 A t_1}{n_{c1}} = \frac{1\cdot380\cdot1{,}44}{34} = 16\ \text{A}. \qquad (3.69)$$

— Diametrul izolat al conductorului se determină cu o relație similară cu relația (3.56 a), adică

$$d'_{iz} = d_{iz}\sqrt{\frac{n_{c1}}{n'_{c1}}} = 1{,}8\sqrt{\frac{38}{34}} = 1{,}9\ \text{mm}. \qquad (3.70)$$

Din STAS 685-75 (anexa 4) se alege, conductorul

$$CuEm\ \Phi\ 1{,}8\ \text{ET} = 2{,}54\ \text{mm}^2. \qquad (3.70\ \text{a})$$

— Densitatea de curent

$$J_1 = \frac{I_N}{a_1 s_{Cu1}} = \frac{16}{1 \cdot 2{,}54} \approx 6{,}3 \text{ A/mm}^2 \qquad (3.71)$$

care se încadrează în limitele indicate în paragraful 1.4.1 B (vol. II).

— Puterea obținută se determină în ipoteza că, deoarece solicitările magnetice în întrefier și dinți sînt mai mici, se va obține cos φ și η cel puțin egale cu cele anterioare. Se poate presupune deci, acoperitor, că puterea crește proporțional cu creșterea curentului, rezultînd valoarea

$$P = \frac{16}{13} \cdot 11 \approx 13{,}5 \text{ kW}. \qquad (3.72)$$

În cazul că ar fi fost necesară trecerea la o turație inferioară, atunci echilibrul solicitărilor se modifică iarăși, dar părțile cu cele mai mari solicitări magnetice vor fi dinții și întrefierul. În această situație determinarea fluxului util pe pol se va face plecînd de la solicitarea normală din întrefier, așa cum s-a procedat și în cazul exemplului de la paragraful 3.2.1 (cum se observă de data aceasta crescînd $2p$, scade τ, ceea ce duce — pentru valori normale ale inducției în întrefier — la scăderea fluxului util pe pol și deci la micșorarea inducțiilor magnetice în juguri).

În concluzie, din cele expuse se observă că, în cazul creșterii turației unei mașini cu solicitări magnetice inițiale la limitele superioare admise, fluxul util al mașinii practic nu mai poate fi crescut, deși τ crește, deoarece ar duce la inducții prea mari în juguri avînd drept consecințe creșterea tensiunilor magnetice și a încălzirii jugurilor, care pot depăși limitele admisibile.

Pe de altă parte, conform figurii 1.11 din vol. II, pentru un τ mai mare, dar p mai mic se poate lua totuși o încărcare liniară A ceva mai mare decît cea inițială. Cum numărul de spire pe fază w_1 nu poate fi modificat prea mult, deoarece ar duce la modificarea fluxului util Φ, rezultă că încărcarea liniară A poate fi crescută numai prin creșterea corespunzătoare a curentului nominal I_N, însă astfel încît să nu se depășească limitele admise pentru densitatea de curent J_1.

Rezultă deci, că în cazul unei creșteri a turației, creșterea puterii motorului este mică, și se obține, în principal, prin creșterea curentului în funcție de limitele admise ale încărcării liniare și de creștere a eficacității ventilației datorită creșterii turației.

În cazul trecerii la o turație inferioară, așa cum s-a mai arătat, τ scade și deci, pentru solicitări magnetice normale în întrefier

și dinți, scade și fluxul util pe pol. Micșorarea fluxului util pe pol, are drept consecință, pentru o anumită tensiune de fază, creșterea numărului de spire pe fază w_1, deci și a numărului de conductoare dintr-o crestătură n_{c1}.

În mod evident creșterea numărului de conductoare în crestături, duce la micșorarea diametrului conductorului și deci la micșorarea curentului nominal, corelată și cu o înrăutățire a ventilației datorită scăderii turației.

Rezultă așadar că, în cazul unei scăderi a turației, puterea mașinii scade în raportul scăderii secțiunii conductorului, odată cu scăderea și a eficacității ventilației.

În ambele cazuri de schimbare a turației, se recomandă însă efectuarea completă a calculelor electromagnetice, deoarece echilibrul solicitărilor electromagnetice fiind stricat sînt posibile surprize la caracteristicile de pornire și funcționare ale mașinii.

3.2.4. INDICAȚII PRIVIND RECALCULAREA UNUI MOTOR ASINCRON CĂRUIA NU I SE CUNOAȘTE NICI O CARACTERISTICĂ INIȚIALĂ (LIPSEȘTE ȘI ÎNFĂȘURAREA STATORULUI ȘI ETICHETA)

În acest caz se pot cunoaște, pe baza măsurătorilor efectuate, numai dimensiunile geometrice ale miezului magnetic și numărul de crestături, atît pentru stator cît și pentru rotor.

După cum s-a menționat, la un motor asincron, pentru o anumită tensiune și frecvență, există o strînsă legătură între dimensiunile miezului magnetic, numărul de crestături ale statorului și rotorului și numărul de poli (sau turație).

Reiese deci că vor trebui mai întîi stabilite aceste legături (compatibilități), astfel încît mașina să rezulte cu solicitări electromagnetice cît mai apropiate de cele normale.

Modul de verificare al acestor compatibilități depinde de tipul rotorului.

— Dacă motorul este cu rotorul bobinat, se calculează numărul de crestături pe pol și fază ale statorului q_1 și rotorului q_2 ($m_2 = m_1$)

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm_1}; \quad q_2 = \frac{Z_2}{2pm_2}$$

care trebuie să fie numere întregi, diferite între ele ($q_2 \neq q_1$) și apropiate de limitele (aproximative) indicate în paragrafele 1.5.1 (pentru q_1) și 1.6.1 A (pentru q_2), din vol. II.

— Dacă motorul este cu rotorul în scurtcircuit compatibilitatea dintre Z_1, Z_2 și $2p$, se verifică pe baza tabelului 1.4 din vol. II, în care sînt recomandate numerele de crestături pentru motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit (este evident că $2p$, rezultă din condiția ca q_1 să fie număr întreg).

Pentru numărul de poli $2p$, stabilit în urma verificării compatibilităților menționate, se trece la efectuarea calculului electromagnetic pe baza dimensiunilor geometrice cunoscute, calcul din care rezultă tipul înfășurărilor și solicitările electromagnetice.

În situațiile în care legăturile de compatibilitate sînt satisfăcute simultan pentru mai multe valori ale numărului de poli $2p$ (deci mai multe turații), din calculul electromagnetic pot rezulta trei cazuri:

a) solicitări magnetice (inducții) normale în toate porțiunile circuitului magnetic. Aceasta înseamnă că numărul de poli $2p$ (deci turația) au fost bine aleși (coincid cu cei inițiali pentru care a fost construită mașina);

b) inducții magnetice normale în întrefier și dinți, dar foarte mari în juguri. Aceasta înseamnă că s-a luat $2p$ prea mic (turație prea mare). Se procedează la mărirea numărului de poli $2p$ (adică la scăderea turației), evident cu verificarea compatibilităților menționate, pînă se obțin solicitări magnetice normale în toate porțiunile circuitului magnetic;

c) inducții magnetice normale în juguri, dar prea mici în întrefier și dinți. În această situație se procedează invers față de cazul *b* (se micșorează $2p$, adică se mărește turația).

Solicitările electrice, se stabilesc astfel:

— Pătura de curent A se stabilește din figura 1.11 (vol. II), din care rezultă curentul nominal al mașinii, așa cum s-a procedat mai sus (vezi relația 3.69).

Se stabilește apoi diametrul conductorului dacă forma crestăturii este ovală sau trapezoidală, din condiția de umplere a crestăturii, similar ca în exemplul de la paragraful 3.2.1. Dacă însă forma crestăturii este de tip cu pereții paraleli, cînd se recomandă conductor profilat sau bare, atunci dimensiunile conductorului se stabilesc tot în funcție de dimensiunile crestăturii și de n_{c1}, dar se ține cont și de modul de așezare a conductoarelor în crestătură (vezi și exemplul de la paragraful 3.1.2). În ambele cazuri, dimensiunile definitive ale conductorului se aleg din STAS-ul respectiv, în apropierea valorilor obținute.

— Densitatea de curent se calculează în funcție de curentul nominal determinat și de secțiunea conductorului rezultată din STAS, similar ca în cazul precedent (vezi relația (3.71)). Valoarea obținută pentru densitatea de curent, trebuie să se încadreze în limitele indicate în paragraful 1.4.1 B, din vol. II.

— *Puterea nominală* aproximativă, rezultată în urma recalculării motorului, se determină cu relația

$$P_N \approx \sqrt{3} U_N I_N \eta \cos \varphi \ [\mathrm{W}] \qquad (3.72\ a)$$

în care η și $\cos \varphi$, se estimează din figura 1.1 sau 1.2 și respectiv din figura 1.3 sau 1.4, din vol. II.

3.3. PROBLEME DE TRANSFORMATOARE

În cele mai multe cazuri, problemele ridicate de repararea sau schimbările datelor nominale ale transformatoarelor, sînt mult mai simple față de cele ale mașinilor electrice rotative.

Astfel, dacă transformatorului i se cunoaște geometria miezului magnetic (parte care se defectează mult mai rar), atunci la dimensionarea și stabilirea înfășurărilor se pornește, ca și în cazul proiectării normale (vezi cap. 5 din vol. II cu „Exemple de calcul"), prin a impune în limitele admisibile, care depind de calitatea tolei utilizate, *inducția magnetică în coloană*, în funcție de care rezultă, pentru secțiunea măsurată a coloanei, fluxul magnetic și inducția în juguri.

Cu valoarea rezultată a fluxului și pentru tensiunile dorite, se determină atît numărul de spire al fiecărei înfășurări (de înaltă și joasă tensiune), cît și distanțele de izolații necesare.

În funcție de tipurile stabilite pentru înfășurări (dictate de obicei de tensiuni) și de dimensiunile măsurate ale ferestrei miezului magnetic, se pot stabili, pentru densitățile de curent recomandate în raport cu modul de răcire folosit, secțiunile și dimensiunile conductoarelor, precum și geometria și dimensiunile înfășurărilor, etapă în care se consideră că dimensionarea este terminată și urmează calculul parametrilor și caracteristicilor transformatorului.

După cum se observă, dacă apar greutăți la aranjarea înfășurărilor în spațiul existent al ferestrei, se poate proceda la reducerea secțiunii conductoarelor, care are drept consecință scăderea curentului și deci a puterii transformatorului, obținută din geometria existentă a miezului magnetic, sau invers dacă rămîne spațiu prea mare.

Problemele mai deosebite ce pot apare în acest domeniu, sînt legate de proiectarea autotransformatoarelor şi a transformatoarelor cu mai multe înfăşurări (cel mai frecvent trei înfăşurări).

3.3.1. CALCULUL AUTOTRANSFORMATORULUI

A. Generalităţi. Avînd de realizat un autotransformator cu raport de transformare constant, se pune problema atît a stabilirii limitelor economice pentru raportul de transformare, cît şi a soluţiei care se poate utiliza, din punct de vedere al construcţiei înfăşurării.

Astfel, considerînd schema de principiu a autotransformatorului monofazat indicată în figura 3.6, relaţia puterii electromagnetice de calcul, pe coloană (şi pe fază) S_{e1}, care stă la baza dimensionării, dată de relaţia (3.4) din volumul II, pentru o fază (mărimile de fază, la autotransformator, corespund şi unei coloane şi se notează cu indicele „1"), este

$$S_{e1} = S_{N1}\,\frac{k-1}{k}\ [\mathrm{VA}] \qquad (3.73)$$

în care :

S_{N1} este puterea nominală, pe fază (şi pe coloană) a autotransformatorului (S_N — puterea aparentă nominală — totală).

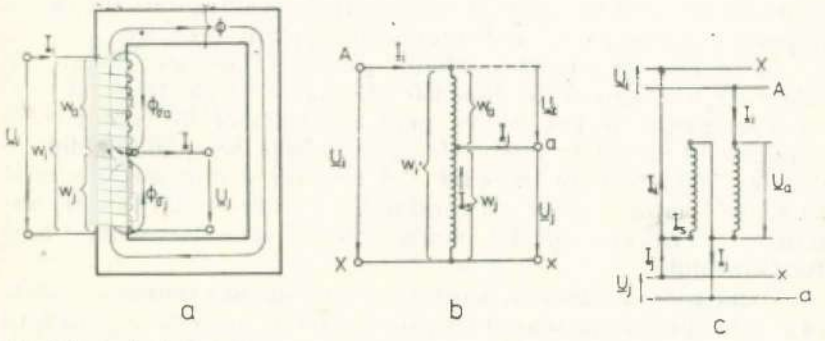


Fig. 3.6 — Autotransformatorul electric monofazat (sau faza A a celui trifazat) :

a — construcţia de principiu ; b, c — variante de scheme de principiu ; w_a — numărul de spire al porţiunii de înfăşurare adiţională, parcursă numai de curentul I pe partea de înaltă tensiune.

Relaţia (3.73) este valabilă şi între puterile aparente ale autotransformatorului : de calcul S_e şi nominală S_N, adică

$$S_e = \frac{k-1}{k}\,S_N\ [\mathrm{VA}]. \qquad (3.73\ a)$$

OBSERVAŢIE. Puterea de calcul S_e, reprezintă puterea transferată dintr-o parte în alta a autotransformatorului, pe cale electromagnetică ; diferenţa de putere

$$S_d = S_N - S_e = S_N\frac{1}{k}\quad [\mathrm{VA}] \qquad (3.73\ b)$$

reprezintă putere transferată (transmisă) direct din primar în secundar, pe cale galvanică.

Dependenţa acestei puteri de calcul de puterea nominală S_N — adică puterea totală transferată din primat în secundar, reiese mai clară din tabelul 3.1, în care se dă şi variaţia puterii transmise direct pe cale galvanică S_d, în funcţie de raportul de transformare $k = w_i/w_j$ (se foloseşte indicele „i" pentru mărimile înfăşurării de înaltă tensiune şi „j", pentru cele ale înfăşurării de joasă tensiune).

TABELUL 3.1

Rapoartele puterilor transferate, în funcţie de raportul de transformare k

k	1	1,5	2	3	10
S_e/S_N	0	$^1/_3$	$^1/_2$	$^2/_3$	$^3/_{10}$
S_d/S_N	1	$^2/_3$	$^1/_2$	$^1/_3$	$^1/_{10}$

Din analiza relaţiei (3.73) şi a tabelului 3.1, rezultă că autotransformatoarele prezintă avantaje numai pentru rapoarte de transformare mici — în general sub 2, cînd transferul de putere se face cu un consum mai mic de materiale faţă de transformator, consum care să compenseze dezavatajul transformatorului care are acelaşi nivel de izolaţie atît în primar cît şi secundar, nivel corespunzător tensiunii cu valoarea cea mai ridicată (a se vedea paragraful 3.1.2 din volumul II). Se remarcă faptul că la transformatoarele mici, cu tensiuni joase şi în cadrul aceluiaşi nivel de izolaţie, autotransformatoarele sînt mai economice faţă de transformatoare şi pentru rapoarte de transformare mai mari.

Autotransformatoarele utilizate sînt atît monofazate cît şi trifazate cînd au, în mod uzual, conexiunea stea şi sînt încărcate simetric. De aceea, studiul lor se poate face numai pe o fază, identic ca la cele monofazate.

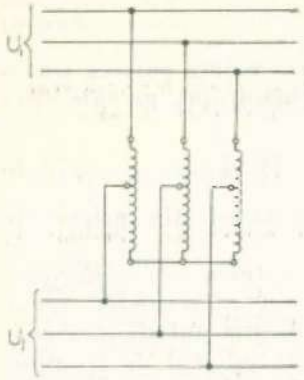


Fig. 3.7 — Schema autotransformatorului trifazat cu raport de transformare constant (a se vedea și fig. 3.48 din vol. II).

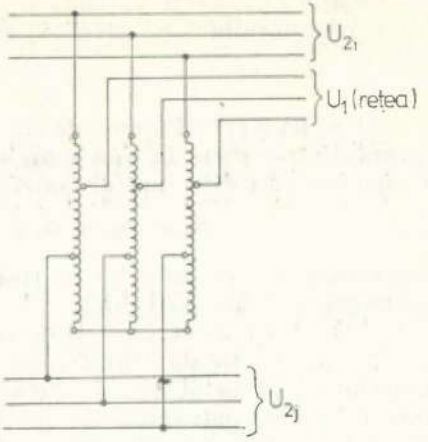


Fig. 3.8 — Schema autotransformatorului trifazat cu două rapoarte de transformare.

În figura 3.6 se dă schema (constructivă și electrică) pentru autotransformatorul monofazat cu raport de transformare constant, iar în figura 3.7, schema electrică pentru autotransformatorul trifazat corespunzător, a cărui putere de calcul se determină cu relația (3.73).

Se reamintește faptul că puterea pe coloană (cu indice „1") servește la dimensionarea miezului magnetic (a diametrului sau secțiunii coloanei); la transformatoarele trifazate și, în cazurile uzuale, la autotransformatoarele trifazate, la care înfășurările fazelor sînt repartizate uniform pe „$c = m$" coloane, puterea pe coloană

$$S_1 = \frac{S_N}{c}, \quad [\text{VA}] \tag{3.74}$$

reprezintă și puterea pe fază.

Dacă repartizarea înfășurărilor se face pe un număr de coloane $c \neq m$ (m = numărul de faze), atunci puterea pe coloană S_1 este diferită de puterea pe fază (a se vedea paragraful 3.2.3, din vol. II).

La autotransformatoarele cu două rapoarte de transformare, cînd în secundar sînt două tensiuni, se pot utiliza două soluții de principiu. Una cînd transformatorul are prize pentru tensiunile corespunzătoare (fig. 3.8) și alta cînd se utilizează bobine

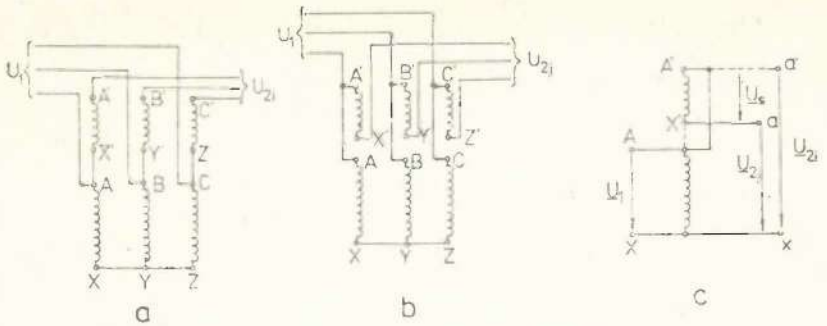


Fig. 3.9 — Schema autotransformatorului cu bobine comutabile (A′ X′, B′ Y′ și C′ Z′):

a — comutarea bobinei pentru tensiunea maximă; b — comutarea bobinei pentru tensiunea minimă; c — schema unei faze (pentru tensiunea minimă) și notarea tensiunilor.

comutabile (fig. 3.9). Autotransformatoarele cu bobine comutabile se pot utiliza cînd valorile tensiunilor secundare se pot scrie sub forma (vezi fig. 3.9 c)

$$U_{2j} = U_1 - U_s; \qquad U_{2i} = U_1 + U_s. \tag{3.75}$$

unde:

U_1 este tensiunea primară (de alimentare);
U_s — tensiunea corespunzătoare bobinei comutabile.

Comparînd cele două tipuri de autotransformatoare din figurile 3.8 și 3.9, se constată că pentru tensiunea maximă $U_{2i} = U_1 + U_s$, schemele sînt identice (fig. 3.9 a), dar pentru tensiunea minimă $U_{2j} = U_1 - U_s$, autotransformatorul cu bobine comutabile are parametrii energetici mai slabi. Acest lucru reiese din compararea relațiilor puterilor de calcul pentru cele două scheme (fig. 3.8 și fig. 3.9 b), cînd au în secundar tensiunea minimă.

Considerînd $k = w_1/w_j \approx U_i/U_j$, pentru cazul din figura 3.8, puterea de calcul a autotransformatorului rezultă

$$S'_s = \frac{k-1}{k} S_N = \frac{U_s}{U_1} S_N \quad [\text{VA}] \tag{3.76}$$

unde:

$$U_i = U_1; \; U_j = U_{2j}; \qquad U_1 - U_j = U_s. \tag{3.76 a}$$

Pentru cazul din figura 3.9 b și c, unde puterea electromagnetică (de calcul) de fază este $S''_{e1} = U_s I_2$, puterea de calcul a autotransformatorului este

$$S''_e = \frac{U_s}{U_{2j}} S_N \text{ [VA]}. \tag{3.77}$$

Comparînd relațiile (3.76) și (3.77), rezultă

$$S''_e = \frac{U_1}{U_{2j}} S'_e > S'_e, \tag{3.78}$$

deoarece $U_1 > U_{2j}$. Deci autotransformatorul din figura 3.9 are, la aceeași putere transmisă și la aceeași tensiune secundară, o putere electromagnetică (de calcul) mai mare, pentru acoperirea pierderilor mai mari din înfășurări. De aceea, schemele din figura 3.9 se utilizează numai în unele cazuri cînd se urmărește obținerea a trei tensiuni: U_2, $U_1 - U_s$ și $U_1 + U_s$, pentru $U_2 \neq U_1 - U_s$.

De remarcat că în toate cazurile se mai pot utiliza și tensiunile dintre oricare din prizele scoase, cu condiția să nu se depășească curenții admiși pentru porțiunile corespunzătoare din înfășurări. De aceea, la autotransformatoarele cu raport de transformare variabil nu se indică puterea transmisă în secundar, ci valoarea curentului maxim admis în secundar.

B. **Aplicație.** Să se dimensioneze un autotransformator trifazat cu înfășurările conectate în stea, care să aibă posibilitatea de a fi alimentat de la rețelele trifazate de 220 V și de 380 V, la frecvența de 50 Hz și să transfere în secundar o putere $S_N = 8$ kVA la tensiunea de 254 V și la tensiunea de 440 V (numai la 254 V sau numai la 440 V, nu simultan la ambele tensiuni secundare).

Determinarea puterii de calcul se face utilizînd relația (3.73) sau, pentru puterile totale, relația (3.73 a).

În cazul de față, deși puterea nominală este aceeași pentru toate tensiunile, puterea electromagnetică de calcul, dată de relația (3.73 a), depinde de raportul de transformare k al tensiunilor. Puterea de calcul cea mai mare va fi pentru raportul de transformare cel mai mare, care în exemplul considerat, este

$$k = \frac{U_{1\max}}{U_{j\min}} = \frac{440}{220} = 2.$$

Rezultă astfel

$$S_e = \frac{k-1}{k} S_N = \frac{2-1}{2} 8 = 4 \text{ kVA}. \tag{3.79}$$

Diametrul coloanei autotransformatorului corespunde deci cu cel al unui transformator de 4 kVA și se determină ca în paragraful 3.2.3, din vol. II.

În cazul că nu se cunosc celelalte mărimi, necesare calculului diametrului, după metodele indicate în paragraful 3.2.3 din vol. II și nici nu se pot estima, atunci se poate proceda, mai simplu, astfel:

— Secțiunea (transversală) netă de fier a coloanei

$$A_c = C_t \sqrt{\frac{S_{e1}}{f}} = (4 \div 6) \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{1\,333}{50}} = (20{,}6 \div 30{,}98) \cdot 10^{-4} \text{m}^2 =$$

$$= (20{,}6 \div 30{,}98) \text{ cm}^2 \tag{3.80}$$

în care:

— puterea aparentă de calcul pe o coloană, pentru $c = m = 3$ coloane

$$S_{e1} = \frac{S_e}{c} = \frac{4 \cdot 10^3}{3} = 1\,333 \text{ VA}; \tag{2. 0 a}$$

— constanta de calcul $C_t = (4 \div 6) \cdot 10^{-4}$.

— Dimensiunile geometrice ale coloanei:

— pentru secțiunea coloanei în trepte (cum se alege în cazul de față)

$$A_c = k_{mc} \frac{\pi D_c^2}{4} \quad [\text{m}^2] \tag{3.81}$$

de unde rezultă, diametrul coloanei (vezi și relația (3.9) din vol. II)

$$D_c = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi k_{mc}}} = 2 \sqrt{\frac{20{,}6 \div 30{,}98}{\pi \cdot 0{,}8}} = 5{,}72 \div 7{,}02 \text{ cm} \tag{3.81 a}$$

în care:

$k_{mc} = k_{Fe} k_g$ este factorul total de umplere a cercului (cu diametrul D_c al coloanei) cu fier, unde:

$k_{Fe} = 0{,}95 \div 0{,}96$ — factorul de umplere a pachetului de tole;

k_g — factorul de umplere a cercului de către treptele coloanei, care se ia din volumul II, tabelul 3.6 sau, pentru transformatoare mici și medii, din tabelul 3.2 (corelat cu fig. 3.10).

TABELUL 3.2

Valorile coeficientului de umplere a cercului unui miez magnetic în trepte

Nr. de trepte	1	2	3	4	5	6
Figura	3.10 a	3.10 b	3.10 c	3.10 d	3.10 e	3.10 f
k_g	0,636	0,786	0,850	0,886	0,908	0,920

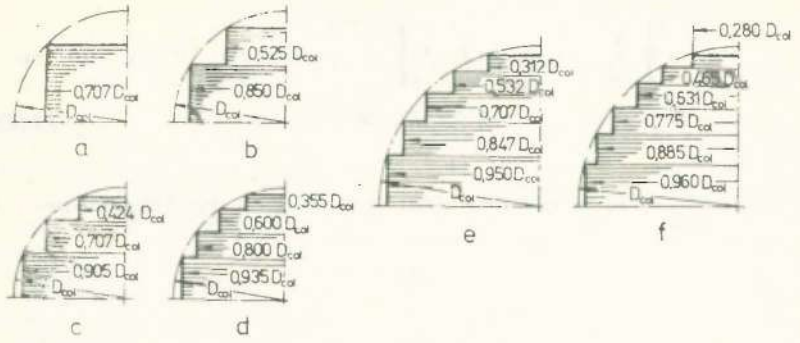


Fig. 3.10 — Dimensiunile treptelor miezului magnetic, astfel încît secțiunea miezului să fie maximă :
a — cu o treaptă ; b — cu două trepte ; c — cu trei trepte ; d — cu patru trepte ; e — cu cinci trepte ; f — cu șase trepte.

În cazul de față considerînd miezul cu 3 trepte $k_g = 0,85$ și deci

$$k_{mc} = 0,95 \cdot 0,85 = 0,8 ;$$

— pentru secțiunea dreptunghiulară a coloanei

$$A_c = k_{Fe} b l_g \ [\text{m}^2] \tag{3.82}$$

de unde, pentru raportul aproximativ $b/l_g = 1 \div 1,5$, rezultă dimensiunile miezului dreptunghiular : lățimea b și lungimea pachetului de tole l_g.

Pe baza valorilor obținute cu relația (3.81 a) se alege diametrul coloanei

$$D_c = 7 \text{ cm} = 70 \text{ mm}. \tag{3.83}$$

Considerînd că circuitul magnetic se realizează din tablă laminată la rece cu cristale orientate de 0,35 mm, iar coloana se realizează cu trei trepte ca în figura 3.10 c, aria secțiunii coloanei determinată ca în figura 3.64, din vol. II și cu $k_{Fe} = 0,95$, rezultă $A_c = 30,3$ cm^2.

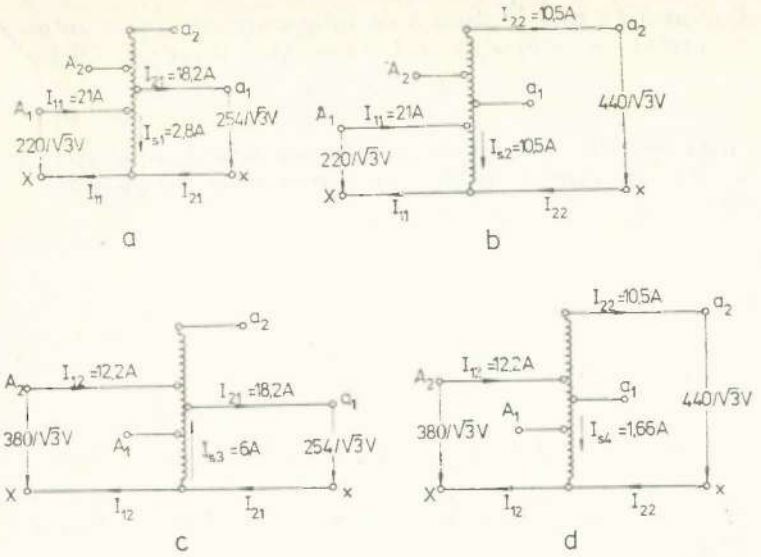


Fig. 3. 11— Schema unei faze a autotransformatorului, cu indicarea tensiunilor și a curenților pentru fiecare pereche de tensiuni de lucru.

Determinarea tensiunilor și curenților de fază pentru toate porțiunile unei înfășurări de fază.

Schemele pentru diferitele posibilități de funcționare a autotransformatorului sînt indicate în figura 3.11.

Valorile tensiunilor de fază, corespunzătoare prizelor unei înfășurări (faza A, fig. 3.11) sînt :

— *pentru primar*	— *pentru secundar*
$U_{A_1X} = 220/\sqrt{3} \approx 127$ V ;	$U_{a_1x} = 254/\sqrt{3} \approx 147$ V ;
$U_{A_2X} = 380/\sqrt{3} \approx 220$ V.	$U_{a_2x} = 440/\sqrt{3} \approx 254$ V.

(3.84)

Curenții nominali, în ipoteza neglijării pierderilor din autotransformator, cu notațiile din figura 3.11 sînt :

— *pentru primar*	— *pentru secundar*
$I_{11} = \frac{S_N}{\sqrt{3}\,U_N} = \frac{8 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} \approx 21$ A ;	$I_{21} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 254} \approx 18,2$ A ;
$I_{12} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} \approx 12,2$ A.	$I_{22} = \frac{8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 440} \approx 10,5$ A.

(3.85)

Curentul I_s, prin porțiunea de înfășurare comună a autotransformatorului, se determină pe baza ecuației (vezi fig. 3.6 b)

$$\underline{I}_i + \underline{I}_s = \underline{I}_j \qquad (3.86)$$

și a legii circuitului magnetic, de-a lungul unei linii de cîmp magnetic util, în care se neglijează curentul de magnetizare (vezi fig. 3.6 a)

$$w_a I_i - w_j I_s = 0 \qquad (3.86\ a)$$

sau

$$\frac{I_i}{I_s} = \frac{w_j}{w_a} = \frac{1}{k-1}.$$

Rezultă astfel

$$I_s = (k-1)I_i = \frac{k-1}{k} I_j. \qquad (3.87)$$

Pentru diferite perechi de tensiuni, cu notațiile din figura 3.11 se obțin :

— pentru cazul din figura 3.11 a

$$I_{s1} = \frac{k-1}{k} I_j = \frac{1{,}15-1}{1{,}15} \cdot 21 = 2{,}8\ \text{A} \qquad (3.88)$$

cu $I_j = I_{11} = 21$ A și $k = w_i/w_j = U_i/U_j = 254/220 = 1{,}15$;

— pentru cazul din figura 3.11 b

$$I_{s2} = \frac{2-1}{2} \cdot 21 = 10{,}5\ \text{A} \qquad (3.88\ a)$$

cu $I_j = I_{11} = 21$ A și $k = 440/220 = 2$;

— pentru cazul din figura 3.11 c

$$I_{s3} = \frac{1{,}5-1}{1{,}5} \cdot 18{,}2 = 6\ \text{A} \qquad (3.88\ b)$$

cu $I_j = I_{21} = 18{,}2$ A și $k = 380/254 \approx 1{,}5$;

— pentru cazul din figura 3.11 d

$$I_{s4} = \frac{1{,}157-1}{1{,}157} \cdot 12{,}2 = 1{,}66\ \text{A} \qquad (3.88\ c)$$

cu $I_j = I_{12} = 12{,}2$ A și $k = 440/380 = 1{,}157$.

Dimensionarea înfășurărilor se face pornind de la respectarea inducțiilor magnetice (numărul de spire) și a densității de curent (secțiunea conductoarelor).

Astfel, alegînd o inducție în coloană $B_c \approx 1{,}6$ T, rezultă tensiunea pe spiră

$$U_w = \pi\sqrt{2} f A_c B_c = \pi\sqrt{2} \cdot 50 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}6 \approx$$

$$\approx 1{,}076\ \text{V/spiră}. \qquad (3.89)$$

— Numărul total de spire, pe fază, al autotransformatorului se determină pentru tensiunea de fază cu valoarea cea mai mare, adică

$$w_{a_2X} = \frac{440/\sqrt{3}}{1{,}076} \approx 236\ \text{spire}. \qquad (3.90)$$

Pentru restul prizelor (fig. 3.11), rezultă :

$$w_{A_1X} = \frac{220/\sqrt{3}}{1{,}076} = 118\ \text{spire} ;\ w_{A_2X} = \frac{380/\sqrt{3}}{1{,}076} = 204\ \text{spire} ;$$

$$w_{a_1X} = \frac{254/\sqrt{3}}{1{,}076} = 136\ \text{spire}. \qquad (3.90\ a)$$

Secțiunile conductoarelor și alegerea tipului de înfășurare. Înfășurarea va fi din cupru, pentru care se alege o densitate de curent $J \approx 3$ A/mm², valoare recomandată pentru puteri de acest ordin, atît pentru transformatoare cu răcire în ulei, cît și pentru cele cu răcire în aer, dar cu izolație clasă F, ca în cazul de față.

Considerînd cele patru cazuri din figura 3.11, se constată că secțiunile conductoarelor diferitelor porțiuni ale înfășurării a_2x, se vor determina pentru curenții cei mai mari care pot circula în situațiile date. Astfel, secțiunea porțiunii A_1X se va determina pentru curentul de 10,5 A (fig. 3.11 b) ; secțiunea porțiunii A_1a_1, pentru curentul de 18,2 A (fig. 3.11 a) ; secțiunea porțiunii A_1a_2 pentru curentul de 12,2 A (fig. 3.11 c) și secțiunea porțiunii A_2a_2, pentru curentul de 10,5 A (fig. 3.11 b și d).

Dimensiunile corespunzătoare ale conductoarelor din care se realizează înfășurarea ar trebui alese deci pentru secțiunile orientative de 6 mm², 4 mm² și 3,5 mm². O diversitate așa mare de secțiuni nu este însă avantajoasă în producție, decît dacă se utilizează același conductor pentru realizarea secțiunilor de mai sus, dar cu număr diferit de fire în paralel. În cazul de față poate fi ales (din anexa 4) conductorul rotund, izolat cu email tereftalic, cu diametrul $d = 1{,}6$ mm și secțiunea $s = 2{,}011$ mm². Se vor utiliza trei conductoare în paralel pentru secțiunea de 6 mm² și cîte

două conductoare în paralel pentru celelalte secțiuni. O altă soluție este de a alege un conductor cu diametrul $d = 2{,}8$ mm și secțiunea $s = 6{,}158$ mm², pentru prima secțiune, și un alt conductor cu diametrul $d = 2.24$ mm și $s = 3{,}941$ mm², pentru celelalte două secțiuni.

Dar, oricare ar fi conductoarele alese, problema principală este cum se va realiza practic înfășurarea, știind că are pe porțiunea A_1X, 118 spire de o secțiune, iar restul de 118 spire de altă secțiune.

La un autotransformator de o asemenea putere și la care nu se pun restricții la raportul de transformare la funcționarea în gol și sarcină, se poate realiza o înfășurare de tip stratificat la care să se scoată prizele X, A_1, a_1, A_2 și a_2. Singura condiție care s-ar pune este aceea de a avea primele 118 spire de o secțiune pe un număr întreg de straturi, iar celelalte 118 spire pe alt număr de straturi (fig. 3.12). Soluția este convenabilă pentru tensiunile de 220/440 V, dar pentru o realizare corespunzătoare a înfășurării, cînd pentru toate prizele se cere simetrizarea axială a solenațiilor, este necesară o analiză mai profundă a modului de organizare a înfășurărilor, pentru diminuarea atît a fluxurilor de dispersie, cît și a forțelor electrodinamice axiale care apar la scurtcircuit.

În cele ce urmează, se vor face cîteva considerații privind modul de organizare a înfășurărilor, în condițiile în care se urmărește simetrizarea axială a solenațiilor.

Se știe din teoria autotransformatorului (vezi și relația (3.86 a)) că,

$$w_j I_s \approx w_a I_i,$$

notațiile fiind cele din figura 3.6. De aceea, cele două părți ale înfășurării parcurse de curenți în oricare din cele patru situații

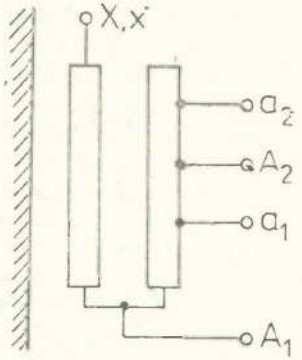


Fig. 3.12 — Schema cu înfășurare stratificată a autotransformatorului, cu bobine nesimetrice cînd funcționează pe prizele intermediare.

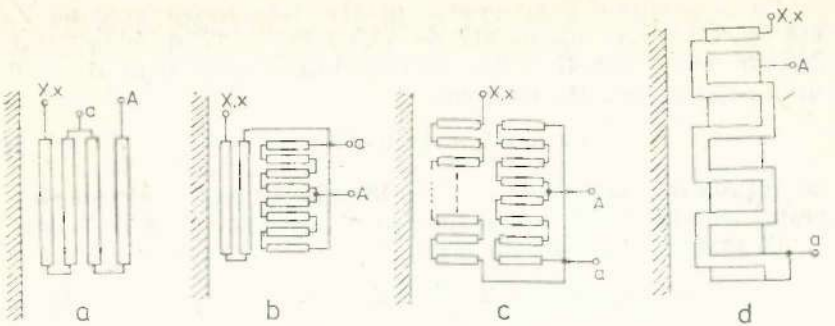


Fig. 3.13 — Scheme de realizare a înfășurărilor autotransformatoarelor cu un singur raport de transformare, în condițiile simetrizării axiale a solenațiilor :

a — înfășurare stratificată ; b — înfășurare formată din bobine cilindrice și galeți ; c — înfășurare în galeți ; d — înfășurare în galeți alternați simetric.

indicate în figura 3.11 trebuie să fie simetrizate, ca și cum ar fi un transformator cu două înfășurări (fig. 3.6 c). Condiția simetrizării este de mare importanță pentru autotransformatoarele cu puteri de calcul peste cîteva sute de kVA. De aceea, în funcție de numărul de spire și de secțiunea lor, la autotransformatoarele cu un singur raport de transformare, înfășurarea se poate organiza în mai multe moduri, o parte din acestea fiind indicate în figura 3.13.

Pentru a concretiza aceste lucruri, se vor considera cazurile *a* și *b* din figura 3.11 ca două autotransformatoare distincte la care se urmărește organizarea înfășurărilor, apoi se va trece la cazul general cu mai multe prize.

a) Autotransformatorul cu raportul de transformare 220/254 V (fig. 3.11 a), este parcurs pe porțiunea de înfășurare A_1X, care are 118 spire, de curentul $I_{s1} = 2.8$ A, iar pe porțiunea A_1a_1, care are 18 spire, de curentul $I_{21} = 18.2$ A.

Pentru cele 118 spire se poate alege conductorul cu secțiunea $s_{s1} = 0{,}9852$ mm² care are diametrul standardizat $d = 1.12$ mm și care izolat cu email tereftalic, are diametrul $d_{iz} = d' = 1{,}192$ mm.

Pentru cele 18 spire, alegînd tot o densitate de curent $J = 3$ A/mm², se poate alege conductorul cu secțiunea $s_{21} \approx 6$ mm².

Dacă se alege o înfășurare stratificată cu cele două părți simetrizate, se poate lua $s_{21} \approx 6{,}158$ mm², adică un conductor de diametru $d = 2.8$ mm și izolat $d' = 2{,}907$ mm. Înălțimea acestei porțiuni de înfășurare cu cele 18 spire, va fi

$$H_a = (18 + 1) \cdot 2{,}907 \approx 55{,}5 \text{ mm}. \qquad (3.91)$$

La o înălțime echivalentă, pentru înfășurarea comună cu 118 spire, rezultă un număr de 55,5/1,192 ≈ 47 spire pe strat, deci ar reveni 118/47 ≈ 2,5 straturi. Luînd două straturi cu 59 spire pe strat, rezultă înălțimea

$$H_{s1} = (59 + 1)\cdot 1{,}192 \approx 72 \text{ mm}, \qquad (3.91\ a)$$

iar înfășurarea adițională cu cele 18 spire se așază într-un strat peste aceasta, acoperind-o simetric pe înălțimea de 55,5 mm.

Grosimea înfășurării în acest caz va fi

$$a = 2\cdot 1{,}192 + 2{,}907 + 2\cdot 0{,}2 \approx 5{,}7 \text{ mm}. \qquad (3.92)$$

Considerînd între diametrul coloanei și înfășurare o distanță $a_0 = 5$ mm, diametrul mediu al înfășurării este

$$D_m = D_c + 2a_0 + a = 70 + 2\cdot 5 + 5{,}7 \approx 86 \text{ mm}. \qquad (3.93)$$

Masa înfășurării, pe fază, va fi

$$G_w = \pi D_m w_j s_{s1} \gamma_{Cu} + \pi D_m w_a s_{s1} \gamma_{Cu} =$$

$$= \pi\cdot 8{,}6\cdot 118\cdot 0{,}9852\cdot 10^{-2}\cdot 8{,}9\cdot 10^{-3} + \pi\cdot 8{,}6\cdot 18\cdot 6{,}158\cdot$$

$$\cdot 10^{-2}\cdot 8{,}9\cdot 10^{-3} = 0{,}28 + 0{,}27 = 0{,}55 \text{ kg}. \qquad (3.94)$$

Pierderile în înfășurarea de fază, conform relațiilor (3.69) din vol. II

$$P_w = k_m(G_{w1}J_1^2 + G_{w2}J_2^2) =$$

$$= 2{,}72(0{,}28\cdot 2{,}84^2 + 0{,}27\cdot 2{,}95^2) \approx 13 \text{ W} \qquad (3.95)$$

unde :

$J_1 = 2{,}8/0{,}9852 \approx 2{,}84$ A/mm² și $J_2 = 18{,}2/6{,}158 \approx 2{,}95$ A/mm² ;

$k_m = 2{,}72$ (din tabelul 3.23, vol. II, pentru conductor din cupru și izolație clasă F), este o constantă de material.

Densitatea de suprafață a pierderilor rezultă

$$q = \frac{P_w}{2\pi D_m H_{-1}} = \frac{13}{2\cdot\pi\cdot 0{,}086\cdot 0{,}072} = 334 \text{ W/m}^2 \qquad (3.96)$$

deci sub limitele admise atît pentru înfășurările în ulei (vezi paragraful 3.4.2 C, din vol. II), cît și pentru cele în aer cu clasa de izolație F (vezi tabelul 3.17 a, unde se consideră că fețele — interioară și exterioară — corespund unor canale cu dimensiuni mari).

La acest exemplu, luat independent, trebuie remarcat faptul că pentru raportul de transformare $k = 254/220 \approx 1{,}15$ și puterea de calcul $S_r = \frac{k-1}{k} S_N = \frac{1{,}15-1}{1{,}15} 8 = 1$ kVA, diametrul ales de 70 mm este mult prea mare și, deci, numărul de spire mic.

Un alt mod de organizare, tot pentru acest caz, se poate obține utilizînd înfășurarea de tip în galeți. Partea adițională va forma un galet cu 18 spire și se va așeza la mijloc, iar partea comună care are 118 spire se va diviza în doi galeți de cîte 59 spire fiecare, care se vor așeza la cele două margini (fig. 3.14).

Pentru a nu se depăși încărcarea termică, grosimea înfășurării trebuie să nu depășească 8 ÷ 10 mm.

Dacă partea auxiliară formează un galet cu două straturi, acesta va avea înălțimea $H = (9 + 1)\cdot 2{,}907 \approx 30$ mm, iar grosimea $a = 2\cdot 2{,}907 + 0{,}2 \approx 6$ mm, grosimea dintre straturi luîndu-se de 0,2 mm (pînză de sticlă, la transformatoarele uscate).

Cei doi galeți ai părții comune, pentru a avea o grosime de același ordin de mărime, vor fi formați din cîte 4 straturi cu cîte 12 spire și un strat cu 11 spire. Dimensiunile unui galet vor fi : $H = (12 + 1)\cdot 1{,}192 \approx 16$ mm, iar grosimea $a = 5\cdot 1{,}192 + 4\cdot 0{,}2 \approx 6{,}75$ mm (vezi fig. 3.14 c). În funcție de alte date, înfășurările pot fi divizate în mai mulți galeți, respectîndu-se atît condițiile de simetrie, cît și cele de natură termică.

b) Autotransformatorul cu raportul de transformare 220/440 V (fig. 3.11 b) — considerat ca unitate independentă — este parcurs pe porțiunea comună a înfășurării A_1X, care are 118 spire,

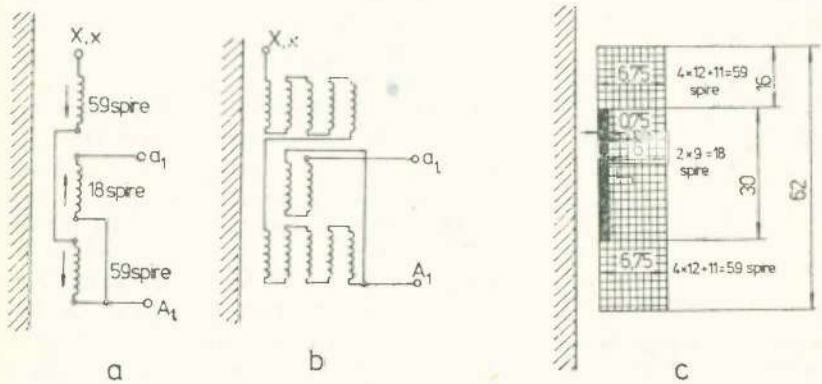


Fig. 3.14 — Organizarea înfășurării în galeți :
a — schema de principiu ; b — schema înfășurării reale ; c — dimensiunile galeților și înfășurării pe fază.

de curentul $I_{s2} = 10{,}5$ A, iar pe porțiunea A_1a_2, care are tot 118 spire, de curentul $I_{22} = 10{,}5$ A. Deoarece, întreaga înfășurare este parcursă de același curent, aceasta se va realiza cu același conductor cu diametrul $d = 2{,}12$ mm (izolat $d_{iz} = d' = 2{,}214$ mm) și cu secțiunea $s = 3{,}530$ mm^2. În acest caz, la o asemenea putere, înfășurarea stratificată este singura care se indică (fig. 3.13 a). Fiecare parte a înfășurării va avea cîte trei straturi a 40 spire fiecare (se vor lua 120 spire în loc de 118, pentru o așezare mai bună), iar cele două părți se suprapun. Înălțimea înfășurării va fi $H = (40 + 1)\cdot 2{,}214 \approx 91$ mm, iar grosimea ei, considerînd-o formată din două bobine (a cîte trei straturi) distanțate de un canal pentru răcire cu lărgimea de 5 mm (pentru aer) rezultă $a = 6\cdot 2{,}214 + 4\cdot 0{,}2 + 5 \approx 19$ mm.

c) Autotransformatorul impus prin temă, cu toate posibilitățile de funcționare și considerat ca o singură unitate, pentru simetrizarea solenațiilor înfășurărilor lui pe toate treptele, necesită o analiză mai detaliată a modului de organizare a înfășurărilor.

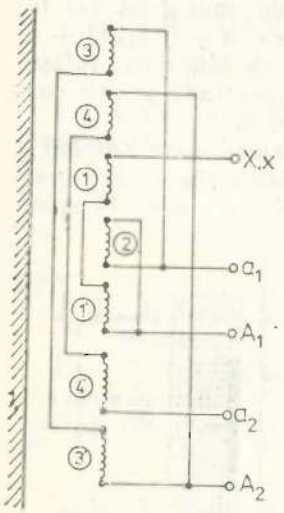


Fig. 3.15 — Schema de principiu pentru înfășurarea autotransformatorului cu două posibilități de alimentare și două tensiuni secundare, cu patru tipuri de galeți notați pe figură.

Pentru simplificarea tehnologiei și reducerea sistemului de aprovizionare, se vor alege două tipuri de conductoare (adică două diametre).

În urma unei analize detaliate, avînd în vedere diferența mare între numerele de spire ale diferitelor porțiuni, se ajunge la concluzia că modul cel mai simplu de simetrizare a solenațiilor se obține dacă se realizează schema din figura 3.15, rezultată prin extrapolarea schemei din figura 3.14, adică o înfășurare în galeți.

Pentru o organizare mai bună a înfășurării, se vor rotunji numerele de spire ale diferitelor porțiuni la valorile: 120 spire pentru porțiunea A_1X, în loc de 118; 20 spire pentru A_1a_1, în loc de 18; 72 spire pentru a_1A_2, în loc de 68; 36 spire pentru A_2a_2, în loc de 32 spire. Înfășurarea va avea deci 248 spire, în loc de 236 spire. Rotunjirile în plus făcute pentru porțiunile A_1X și $A_1a_1 + A_1a_2$ care se alimentează, conduc la scăderea inducției magnetice în coloană la o valoare sub 1,6 T; creșterea numărului

de spire la celelalte porțiuni, s-a impus din condiția menținerii rapoartelor de transformare.

După cum s-a specificat, pentru realizarea înfășurării se aleg două conductoare: unul cu diametrul $d = 2{,}8$ mm (izolat $d' = 2{,}907$) și secțiunea $s = 6{,}158$ mm^2 pentru porțiunea A_1a_1 care are 20 spire, și altul cu diametrul $d = 2{,}12$ mm (izolat $d' = 2{,}214$) și $s = 3{,}530$ mm^2 pentru restul înfășurării care are 228 spire. Dimensiunile celor patru tipuri de galeți utilizați, se determină în funcție de dimensiunile conductoarelor și de grosimea admisă a galeților.

Astfel, galeții de tip 1, 3 și 4 realizați din același conductor și cu trei straturi, vor avea grosimea (fig. 3.16) $a = 3\cdot 2{,}214 + 2\cdot 0{,}2 \approx 7$ mm, iar galetul 2 cu două straturi grosimea $a = 2\cdot 2{,}907 + 0{,}2 \approx 6$ mm. Deci galetul 2 va trebui să aibă un adaos de 1 mm format din $4 \times 0{,}25$ mm pînză de sticlă, pentru a avea același diametru exterior ca ceilalți galeți.

Înălțimile galeților, ale căror indice este același cu indicele tipului de galet (fig. 3.16 a), sînt:

$$H_1 = (20 + 1)2{,}214 \approx 47 \text{ mm}; \; H_2 = (10 + 1)2{.}907 \approx 32 \text{ mm};$$
$$H_3 = (12 + 1)2{,}214 \approx 29 \text{ mm și } H_4 = (6 + 1)2{,}214 \approx 16 \text{ mm}.$$

Înălțimsa totală a înfășurării, considerînd că între galeți sînt discuri de 0,5 mm este

$$H_{\Sigma} = H_2 + 2(H_1 + H_3 + H_4) + 6\cdot 0{,}5 \approx 219 \text{ mm} \approx 22 \text{ cm}. \tag{3.96}$$

În figura 3.16 a se prezintă organizarea înfășurării autotransformatorului, iar în figura 3.16 b, c, d și e, distribuirea solenațiilor în cadrul înfășurării pentru cele patru posibilități de lucru indicate în figura 3.11.

Trebuie menționat faptul că, la autotransformatoarele mai mari cu conductoare de secțiune mai mare, se puteau pune în paralel galeții care sînt perechi, alegîndu-se adecvat sensul de parcurgere al acestora.

Restul calculelor de dimensionare a miezului magnetic (dimensiunile ferestrei și jugurilor) precum și de determinare a parametrilor și caracteristicilor, sînt identice cu cele de la transformatoare, menționate în vol. II.

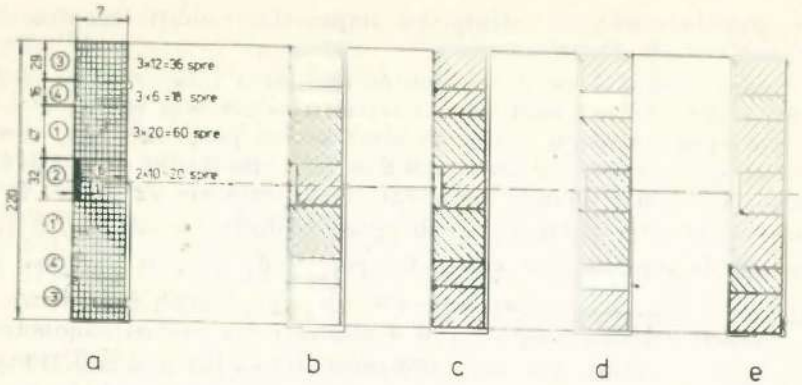


Fig. 3.16 — Înfășurarea pentru cazul general și distribuirea solenațiilor : a — organizarea și dimensiunile unei înfășurări ; b — distribuția solenațiilor pentru tensiunile 220/254 V ; c — distribuția solenațiilor pentru tensiunile 220/440 V ; d — distribuția solenațiilor pentru tensiunile 380/254 V ; e — distribuția solenațiilor pentru tensiunile 380/440 V.

3.3.2. INDICAȚII PRIVIND CALCULUL TRANSFORMATORULUI CU TREI ÎNFĂȘURĂRI

După cum se știe, transformatoarele cu trei înfășurări se utilizează în special în stațiile centralelor electrice ; ele primesc puterea nominală prin înfășurarea primară și o transmit prin celelalte două înfășurări, considerate secundare. De aceea înfășurarea primară se dimensionează pentru puterea nominală, iar înfășurările secundare pentru puterile specificate în datele de proiectare, puteri mai mici decît cea nominală.

Calculul unui transformator cu trei înfășurări nu diferă, în principiu, de cel al unui transformator cu două înfășurări. Sînt necesare însă următoarele precizări, dictate de particularitățile constructive pe care transformatoarele cu trei înfășurări le prezintă, față de cele cu două înfășurări.

— Puterea de calcul (sau de tip) a unui transformator cu trei înfășurări, pentru care se face dimensionarea miezului magnetic (diametrul coloanei), dacă nu se indică în mod expres în temă, se ia ca semisuma puterilor indicate pentru cele trei înfășurări. Aceasta, ar reprezenta puterea unui transformator echivalent cu două înfășurări.

— Lățimea ferestrei (distanța dintre coloane) se ia mai mare cu 10÷15%, față de un transformator cu două înfășurări, ca urmare a înfășurării și distanțele de izolație respective, care intervin în plus.

— Modul de aranjare a celor trei înfășurări pe coloane (ordinea lor) trebuie făcută în funcție de următoarele considerente :

— obținerea unor caracteristici (tensiuni de scurtcircuit) pentru diferitele perechi de înfășurări, cît mai apropiate de cele impuse, astfel încît dimensiunile ferestrei să fie minime ;

— o coordonare cît mai judicioasă a izolației transformatorului ;

— posibilitatea ușurării tehnologiei de execuție a prizelor de reglaj a tensiunii.

Pentru exemplificarea modului cum trebuie rezolvate problemele menționate, se consideră un transformator trifazat cu trei înfășurări cu următoarele date nominale, principale :

— puterile înfășurărilor : 40/20/30 MVA ;
— tensiunile celor trei înfășurări : 60 ± 4%/20 ± 5%/6,3 kV ;
— tensiunile de scurtcircuit :
  — pentru perechea de înfășurări de 60 și 20 kV, la puterea de 20 MVA : $u_{k13} = 8{,}3\%$;
  — pentru perechea de înfășurări de 60 și 6,3 kV, la puterea de 30 MVA : $u_{k13} = 8{,}5\%$;
— schemele și grupele de conexiuni : $Yyo - Yd11$;
— tensiunea de alimentare (primară) : 60 kV.

— Puterea de calcul (de tip) a transformatorului, recalculată pentru un transformator cu două înfășurări, pentru care se determină diametrul coloanei va fi

$$S = \frac{40 + 20 + 30}{2} = 45 \text{ MVA}. \qquad (3.97)$$

— Dispunerea celor trei înfășurări, se face în primul din necesitatea obținerii aproximativ acelorași valori pentru tensiunile de scurtcircuit dintre înfășurarea întîia (primară) și a treia pe de o parte și dintre înfășurarea întîia și a doua pe de altă parte. Din această cauză, înfășurarea primară de 60 kV, va fi dispusă la mijloc. În al doilea rînd, deoarece înfășurarea de 6,3 kV (de joasă tensiune) nu este prevăzută cu prize intermediare de reglaj a tensiunii și din motivele coordonării izolației transformatorului, aceasta va fi dispusă la interior, lîngă coloane ; înfășurarea de 20 kV (de medie tensiune) care are și prize de reglaj a tensiunii se va dispune deci la exterior.

— Distanța dintre axele coloanelor, deci și lățimea ferestrei, va rezulta mai mare din condiția amplasării celor trei înfășurări, așa cum se indică în figura 3.17.

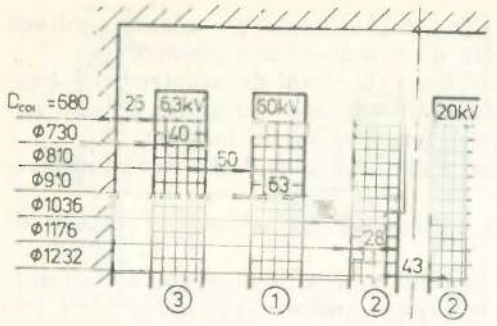


Fig. 3.17 — Dispunerea și dimensiunile celor trei înfășurări ale transformatorului de 40/20/30 MVA.

Din figura 3.17, se poate observa că distanța dintre înfășurarea de 60 kV și înfășurarea de 20 kV, s-a mărit la 70 mm, față de 40 mm cît ar fi fost necesar din condiții de izolație, adică tocmai cu grosimea conductoarelor izolate (cu diametrul de cca 30 mm) cu care se scot prizele de reglaj ale înfășurării primare.

OBSERVAȚIE. Determinarea componentelor reactive ale tensiunii de scurtcircuit dintre înfășurările învecinate u_{k12} și u_{k13} (vezi fig. 3.17), se face identic ca la transformatorul cu două înfășurări, cu relația (3.80) din vol. II, în care lățimea echivalentă a canalului de dispersie se determină cu relația (3.81), din vol. II.

Componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit între înfășurările extreme u_{k23}, se face tot cu relația (3.80) din vol. II, însă în lățimea echivalentă a canalului de dispersie dată de relația (3.81), din vol. II, în locul distanței dintre cele două înfășurări alăturate a_{12}, se va considera distanța totală dintre înfășurările extreme (adică pe lîngă cele două distanțe dintre înfășurarea interioară și cea mijlocie și dintre înfășurarea mijlocie și cea exterioară, se va lua și grosimea înfășurării mijlocii).

3.4. PROBLEME DE MAȘINI SINCRONE

În principiu, problemele de reproiectare sau de recalculare în diferite situații ale mașinilor sincrone, sînt similare cu ale celorlalte tipuri de mașini electrice.

Astfel, statorul mașinilor sincrone normale (cu inductorul pe rotor) se recalculează similar ca cel al mașinilor asincrone, în afară de situația unei eventuale schimbări de turație, fără schimbarea frecvenței, cînd va trebui de modificat nu numai numărul de poli ai înfășurării statorice, ci și numărul de poli ai rotorului ceea ce necesită deci modificări radicale adică, practic trebuie schimbat tot rotorul, ceea ce înseamnă o altă mașină.

Recalculările rotorului mașinii sincrone, adică ale înfășurării de excitație, se fac similar ca ale înfășurării derivație (sau separată) ale mașinilor de curent continuu.

De aceea, în cele ce urmează se vor avea în vedere în special, unele probleme de calcul mai deosebite ce vizează în primul rînd, modul de comportare a mașinilor sincrone în exploatare, atunci cînd se produc variații brusce de sarcină, problemă frecvent întîlnită și foarte importantă pentru ceilalți consumatori legați la aceeași rețea.

3.4.1. DETERMINAREA CĂDERII DE TENSIUNE LA BORNELE GENERATORULUI SINCRON, LA CUPLAREA BRUSCĂ A UNEI SUPRASARCINI DE CURENT

În cazul generatoarelor sincrone care lucrează pe rețele proprii, cum sînt cele ce echipează grupurile electrogene navale, grupurile electrogene de foraj etc., determinarea căderii de tensiune la borne la cuplarea bruscă a unei sarcini suplimentare de curent, este deosebit de importantă.

Dacă această cădere de tensiune depășește anumite limite, se poate produce declanșarea protecțiilor de minimă tensiune ale anumitor consumatori deja în funcțiune, apărînd astfel mari dereglări în funcționarea întregii instalații.

Se impune deci determinarea căderilor de tensiune la bornele generatorului în cazurile în care sînt necesare cuplări brusce a unor consumatori, în funcție de care se stabilesc măsurile ce trebuie luate pentru evitarea neajunsurilor menționate.

Pentru o înțelegere mai bună a problemei, se va avea în vedere cazul concret al generatorului sincron cu poli aparenți de 440 kVA ; 6,3 kV ; 1 000 rot/min, din exemplul de calcul prezentat în capitolul II, cazul 1.

În vederea stabilirii modului de lucru și a relațiilor de calcul necesare regimului tranzitoriu care apare la aplicarea în mod brusc a unei suprasarcini de curent, se trasează în figura 3.18 și 3.19, diagramele fazoriale ale regimului staționar (la funcționarea normală) și ale regimului tranzitoriu, pentru datele nominale ale generatorului din exemplul considerat.

La trasarea acestor diagrame s-au folosit reactanțele nesaturate ale mașinii, deoarece avînd variații ale tensiunii (căderi de tensiune), saturația magnetică va varia și ea, dar cu tendința spre starea nesaturată a mașinii.

Se consideră că, inițial, generatorul funcționează la regimul nominal cu

$$\underset{\sim}{U}_{1i} = \underset{\sim}{U}_{1N} = 1 \text{ u.r.} ; \quad \underset{\sim}{I}_{1i} = \underset{\sim}{I}_{1N} = 1 \text{ u.r.} ;$$

$$\cos \varphi_i = \cos \varphi_N = 0{,}8 ; \quad \sin \varphi_i = 0{,}6 . \ (\varphi_i = 36{,}87°)$$

căruia îi corespunde impedanța de sarcină inițială

$$z_i = r_i + jx_i \text{ [u.r.]} \tag{3.98}$$

astfel încît

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \operatorname{tg} \varphi_N = \frac{x_i}{r_i}$$

unde cu indicele „i" s-au notat, mărimile inițiale (înainte de aplicarea suprasarcinii) ; cele fără indicele „i" corespund regimului tranzitoriu (după aplicarea bruscă a suprasarcinii).

Pentru o ușoară urmărire a mersului problemei se reamintesc principalele date necesare, ale generatorului cu poli aparenți considerat :

$x_1 = 0{,}088$ u.r. ; $\quad x_d = 1{,}4$ u.r. ;
$x_{ad} = 1{,}31$ u.r. ; $\quad x_q \approx 0{,}8$ u.r. ;
$x_{aq} = 0{,}705$ u.r. ; $\quad x'_d = 0{,}303$ u.r.

Pe baza figurii 3.18 se pot obține :

— *unghiul intern* θ_i.

Pornind de la relația evidentă

$$\underset{\sim}{U}_{1i} \sin \theta_i = \underset{\sim}{I}_{1i} x_q \cos \psi_i = \underset{\sim}{I}_{1i} x_q \cos(\theta_i + \varphi_i) \tag{3.99}$$

și efectuînd calculele trigonometrice, rezultă

$$\operatorname{tg} \theta_i = \operatorname{tg} \theta_N = \frac{\underset{\sim}{I}_{1i} x_q \cos \varphi_i}{\underset{\sim}{U}_{1i} + x_q \underset{\sim}{I}_{1i} \sin \varphi_i} = \frac{1 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}8}{1 + 0{,}8 \cdot 1 \cdot 0{,}6} = 0{,}433 \tag{3.99 a}$$

căruia îi corespund unghiurile

$$\theta_i = 23{,}4° ;$$

$$\psi_i = \varphi_i + \theta_i = 36{,}87 + 23{,}4 = 60{,}27° ;$$

— *t.e.m. inițială* E''_{0i} (pe caracteristica liniară)

$$\underset{\sim}{E}''_{0i} = \underset{\sim}{U}_{1i} \cos \theta_i + \underset{\sim}{I}_{1i} x_d \sin \psi_i = 1 \cos 23{,}4° + 1 \cdot 1{,}4 \sin 60{,}27° \approx 2{,}14 \text{ u.r.} \tag{3.100}$$

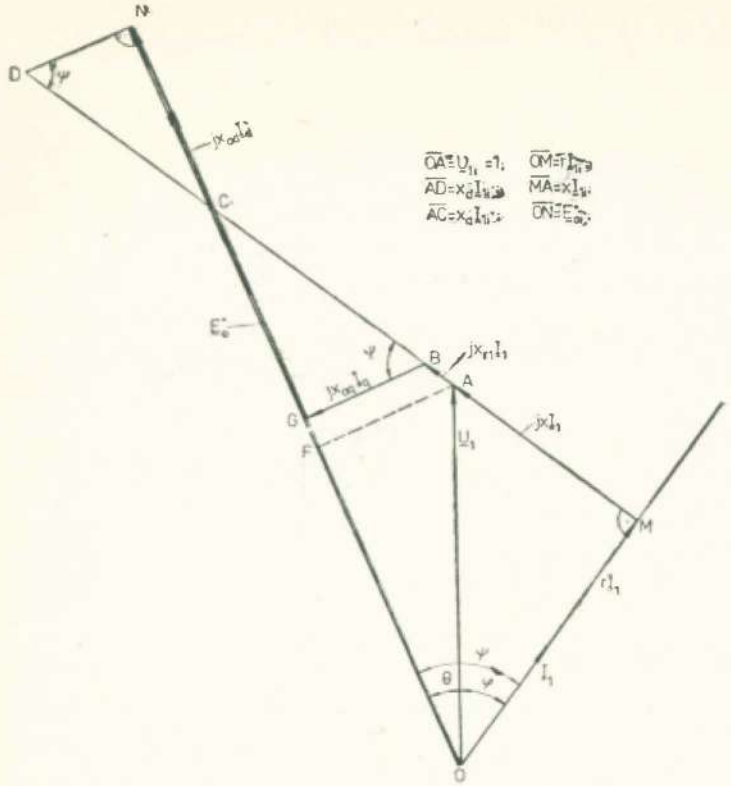


Fig. 3.18 — Diagrama fazorială, pentru regimul staționar, a generatorului sincron cu poli aparenți și varianta combinată.

S-ar părea, că este o diferență relativ importantă între valoarea lui $E''_{0i} = 2{,}14$ u.r. rezultată cu relația (3.100) și valoarea $E''_0 = 2{,}29$ obținută la punctul 2.12.5 de pe caracteristica liniară de funcționare în gol din figura 2.5 a. Dacă se are însă în vedere faptul că E''_0 s-a determinat, de pe caracteristica liniară de funcționare în gol, pentru un curent de excitație majorat cu cca 4% față de valoarea reală rezultată din figura 2.3 a (vezi relațiile (2.77) și (2.77 a)), și că valoarea solenației de excitație la sarcină nominală a fost determinată, la rîndul său, pentru starea saturată a mașinii, rezultă că această diferență este sub 3% ceea ce este cu totul acceptabil. De altfel, aceste diferențe pot depinde și de

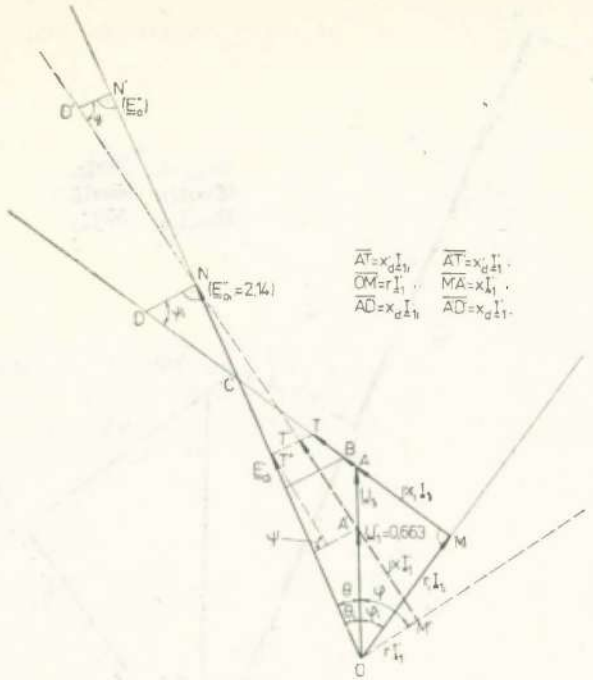


Fig. 3.19 — Diagrama fazorială, pentru regimul tranzitoriu, a generatorului sincron cu poli aparenți și varianta combinată.

factori subiectivi cum sînt: precizia trasării tangentei în origine la caracteristica reală de funcționare în gol, alegerea coeficienților k_{ad} și k_{aq} din curbe etc.

Valoarea t.e.m. tranzitorii corespunzătoare stării inițiale se poate obține, pe baza figurii 3.19, după o serie de relații intermediare, cu relația finală.

$$\underset{\sim}{E}'_{di} = \underset{\sim}{E}''_{0\,i}\,\frac{x'_d}{x_d} + \underset{\sim}{U}_{1i}\,\frac{x_d - x'_d}{x_d}\cos\theta_i = 2{,}14\,\frac{0{,}303}{1{,}4} +$$

$$+ 1\,\frac{1{,}4 - 0{,}303}{1{,}4}\cos 23{,}4^\circ = 1{,}18 \text{ u.r.} \qquad (3.101)$$

Față de această stare inițială, se consideră, de exemplu, o suprasarcină bruscă de curent $\underset{\sim}{I}_s = 2\underset{\sim}{I}_{1i}$ la $\cos\varphi_s = 0{,}4$.

Pentru sarcina inițială, considerată cea nominală, rezultă

$$\underset{\sim}{I}_{1i} = \underset{\sim}{I}_a - j\underset{\sim}{I}_r = \underset{\sim}{I}_{1i}\cos\varphi_i - j\underset{\sim}{I}_{1i}\sin\varphi_i = 0{,}8 - j0{,}6$$

și

$$\underset{\sim}{z}_i = \frac{\underset{\sim}{U}_{1i}}{\underset{\sim}{I}_{1i}} = \frac{1}{0{,}8 - j0{,}6} = 0{,}8 + j0{,}6 \text{ u.r.}$$

În cazul încărcării în mod brusc cu o suprasarcină de curent de două ori curentul nominal ($I_s = 2I_{1i}$), atunci, pentru tensiunea inițială, care era cea nominală $\underset{\sim}{U}_{1N} = 1$, dar la $\cos\varphi_s = 0{,}4$ ($\sin\varphi_s = 0{,}917$), cînd

$$\underset{\sim}{I}_s = \underset{\sim}{I}_s\cos\varphi_s - j\underset{\sim}{I}_s\sin\varphi_s = 2\cdot 1\cdot(0{,}4 - j0{,}917) =$$

$$= 0{,}8 - j1{,}834 \text{ u.r.} \qquad (3.102)$$

curentul total din stator va fi

$$\underset{\sim}{I}_1 = \underset{\sim}{I}_{1i} + \underset{\sim}{I}_s = 0{,}8 - j0{,}6 + 0.8 - j1.834 =$$

$$= 1{,}6 - j2{,}434 \text{ u.r.}$$

Impedanța corespunzătoare a sarcinii va fi

$$\underset{\sim}{z} = \frac{\underset{\sim}{U}_{1i}}{\underset{\sim}{I}_1} = \frac{1}{1{,}6 - j2{,}434} = 0{,}189 + j0.287 \text{ u.r.} \qquad (3.103)$$

de unde

$$r = 0{,}189 \text{ u.r.}\,;\; x = 0.287 \text{ u.r.} \qquad (3.103\text{ a})$$

În primul stadiu tranzitoriu, unghiurile față de fazorul E''_0 se obțin cu relațiile (fig. 3.19), pentru punctele cu semnul prim ('):

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{x + x_q}{r} = \frac{0{,}287 + 0{,}8}{0{,}189} = 5{,}72 \Rightarrow \psi = 80{,}09^\circ; \qquad (3.104)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{r} = \frac{0.287}{0{,}189} = 1{,}52 \Rightarrow \varphi = 56{,}63^\circ;$$

$$\theta = \psi - \varphi = 80{,}09^\circ - 56{,}63^\circ = 23{,}45^\circ.$$

După cum se vede, unghiul intern rămîne practic neschimbat ($\theta \approx \theta_i$). În această primă stare tranzitorie, valoarea inițială a t.e.m. tranzitorii $\underset{\sim}{E}'_{di}$, va rămîne nemodificată, însă curentul

va face un salt de la valoarea inițială $\underset{\sim}{I}_{1i} = 1$ u.r. la valoarea $\underset{\sim}{I}'_1$, care rezultă din relația, evidentă, obținută pe baza figurii 3.19

$$\underset{\sim}{E}'_{di} = x'_d \underset{\sim}{I}'_1 \sin\psi + \underset{\sim}{U}'_1 \cos\theta = x'_d \underset{\sim}{I}'_1 \sin\psi + \underset{\sim}{I}'_1 \sqrt{r^2 + x^2}\cos\theta \tag{3.105}$$

de unde

$$\underset{\sim}{I}'_1 = \frac{\underset{\sim}{E}'_{di}}{x'_d \sin\psi + \sqrt{r^2 + x^2}\cos\theta} = \frac{1{,}18}{0{,}303 \sin 80{,}09° + \sqrt{0{,}189^2 + 0{,}287^2}\cos 23{,}45°} = 1{,}92 \text{ u.r.} \tag{3.105 a}$$

În primul moment ($t \approx 0$), tensiunea la borne scade brusc la valoarea $\underset{\sim}{U}'_1$ dată de relația (se neglijează procesul supratranzitoriu care este foarte scurt — cca 0,03÷0,05 s)

$$\underset{\sim}{U}'_1 = \underset{\sim}{I}'_1 \sqrt{r^2 + x^2} = 1{,}92 \sqrt{0{,}189^2 + 0{,}287^2} = 0{,}663 \text{ u.r.} \tag{3.106}$$

Rezultă deci că la șocul de curent considerat ($\underset{\sim}{I}_s = 2\underset{\sim}{I}_{1i} = 2\underset{\sim}{I}_{1N}$), căderea de tensiune bruscă, la bornele generatorului este

$$\Delta\underset{\sim}{U} = \underset{\sim}{U}_{1i} - \underset{\sim}{U}'_1 = 1 - 0{,}663 = 0{,}337 \text{ u.r.}$$

(adică 33,7% din $U_{1i} = U_{1N}$). (3.107)

Această cădere de tensiune tranzitorie la $t \approx 0$, este proprie generatorului respectiv corelat cu sarcina aplicată brusc și nu poate fi compensată cu nimic în această primă etapă. Dar, în etapa imediat următoare, deoarece excitația corespunzătoare datelor inițiale nu se modifică, rezultă că t.e.m. inițială $\underset{\sim}{E}''_{0i}$ se modifică în $\underset{\sim}{E}''_0$, a cărei valoare se obține tot cu relația (3.100), dar pentru valorile termenilor, corespunzătoare noului regim, adică

$$\underset{\sim}{E}''_0 = \underset{\sim}{U}'_1 \cos\theta + \underset{\sim}{I}'_1 x_d \sin\psi = 0{,}663 \cos 23{,}4° + 1{,}92 \cdot 1{,}4 \cdot \sin 80{,}09° = 3{,}26 \text{ u.r.} \tag{3.108}$$

Dacă, în continuare, nu se intervine cu suplimentarea corespunzătoare a solenației de excitație, atunci t.e.m. $\underset{\sim}{E}''_0$ revine la valoarea inițială $\underset{\sim}{E}''_{0i}$, într-un interval de timp dat de constanta de timp

$$T'_s = T_e \frac{r^2 + (x + x_q)(x + x'_d)}{r^2 + (x + x_q)(x + x_d)} \tag{3.109}$$

unde :

T_e este constanta de timp a înfășurării de excitație, dată de relațiile (1.178),

iar tensiunea la borne scade la valoarea

$$\underset{\sim}{U}_1 = \underset{\sim}{U}'_1 \frac{\underset{\sim}{E}''_{0i}}{\underset{\sim}{E}''_0} = 0{,}663 \frac{2.14}{3{,}26} = 0{,}435 \text{ u.r.} \tag{3.110}$$

Curentul generatorului va scădea și el în același raport ca și tensiunea, adică

$$\underset{\sim}{I}_1 = \underset{\sim}{I}'_1 \frac{\underset{\sim}{E}''_{0i}}{\underset{\sim}{E}''_0} = 1{,}92 \frac{2{,}14}{3{,}26} = 1{,}26 \text{ u.r.} \tag{3.111}$$

Va scădea în același timp și t.e.m. tranzitorie corespunzătoare noului regim, la valoarea

$$\underset{\sim}{E}'_d = \underset{\sim}{E}'_{di} \frac{\underset{\sim}{I}_1}{\underset{\sim}{I}'_1} = 1{,}18 \frac{1{,}26}{1{,}92} = 0{.}776 \text{ u.r.} \tag{3.112}$$

Dacă în această perioadă va interveni un regulator automat de tensiune, atunci t.e.m. $\underset{\sim}{E}''_0$ nu va mai scădea pînă la $\underset{\sim}{E}''_{0i}$ ci se va opri la o valoare $\underset{\sim}{E}''_{0\,min} > \underset{\sim}{E}''_{0\,i}$, modificînd iarăși valoarea căderii de tensiune astfel încît, în final, tensiunea la bornele generatorului va fi

$$\underset{\sim}{U}_1 = \underset{\sim}{U}'_1 \frac{\underset{\sim}{E}''_{0\,mi.}}{\underset{\sim}{E}''_0} \quad [\text{u.r.}]. \tag{3.113}$$

Valorile lui $\underset{\sim}{E}''_{0\,min}$ și a timpului de restabilire a procesului tranzitoriu, depind atît de parametrii generatorului și regulatorului, cît și de modul de corelare dintre acestea, adică de:

— viteza de excitație (creșterea medie a tensiunii de excitație, pe secundă, comparativ cu tensiunea de excitație, la sarcină nominală);

— capacitatea de excitație $U_{e\,max}/U_{eN}$ (pragul de forțare al excitației);

— constantele de timp T_e și T'_s.

Metoda expusă mai sus pentru generatoarele sincrone cu poli aparenți, se poate aplica și la cele cu poli înecați, dar cu particularizările respective ale parametrilor și diagramelor fazoriale.

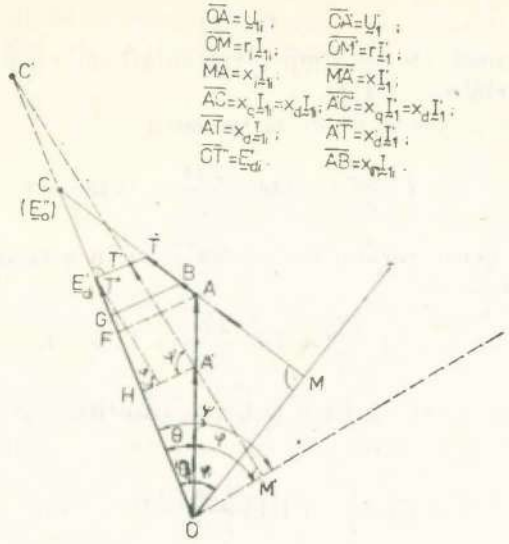


Fig. 3.20 — Diagrama fazorială, pentru regimul tranzitoriu, a generatorului sincron cu poli înecați.

Aceasta înseamnă că, dacă în diagramele fazoriale din figurile 3.18 și 3.19 se consideră $\overline{AC} = x_d \underline{I}_{1i} = x_q \underline{I}_{1i}$ (deoarece $x_d = x_q$), se obține diagrama fazorială din figura 3.20 a generatorului cu poli înecați. După cum se observă din această diagramă, toate relațiile stabilite anterior rămîn valabile și în acest caz.

TABELUL 1-1

Factorul de scurtare și de înfășurare al înfășurării trifazate, în două straturi

q	*Pasul* y_1	$\beta_y = y_1/y_\tau$	k_y	k_w	q	*Pasul* y_1	$\beta_y = y_1/y_\tau$	k_y	k_w
$1^1/_6$	1–3	0,835	0,97	0,924	$2^1/_7$	1–8	0,907	0,989	0,944
						1–7	0,778	0,94	0,90
$1^1/_4$	1–4	0,8	0,95	0,910	$2^1/_5$	1–9	0,952	0,997	0,953
						1–8	0,833	0,966	0,922
$1^2/_5$	1–5	0,95	0,985	0,953		1–7	0,715	0,902	0,862
$1^1/_2$	1–5	0,89	0,985	0,94	$2^7/_8$	1–9	0,927	0,994	0,948
						1–8	0,81	0,956	0,913
$1^4/_5$	1–6	0,926	0,994	0,948	3	1–10	1	1	0,96
						1–9	0,89	0,985	0,915
$1^7/_8$	1–6	0,89	0,985	0,94		1–8	0,778	0,94	0,902
						1–7	0,667	0,866	0,831
2	1–6	0,833	0,966	0,934	$3^1/_5$	1–10	0,938	0,995	0,95
						1–9	0,833	0,966	0,922
$2^1/_{10}$	1–7	0,952	0,998	0,953	$3^1/_4$	1–10	0,923	0,993	0,948
	1–6	0,794	0,955	0,912		1–9	0,82	0,959	0,916
						1–8	0,718	0,903	0,862
$2^1/_8$	1–7	0,94	0,992	0,95	$3^3/_7$	1–10	0,875	0,981	0,937
	1–6	0,764	0,943	0,90		1–9	0,778	0,94	0,902
$2^1/_7$	1–7	0,933	0,995	0,95	$3^1/_2$	1–11	0,952	0,997	0,953
	1–6	0,778	0,94	0,90		1–10	0,857	0,974	0,93
						1–9	0,762	0,93	0,884
$2^1/_6$	1–7	0,91	0,99	0,945		1–8	0,667	0,866	0,831
	1–6	0,76	0,925	0,887					
$2^1/_2$	1–8	0,933	0,995	0,95	$3^3/_5$	1–11	0,925	0,99	0,945
	1–7	0,8	0,951	0,907		1–10	0,835	0,97	0,923
	1–6	0,667	0,866	0,827		1–9	0,743	0,917	0,877

TABELUL 1-I (continuare)

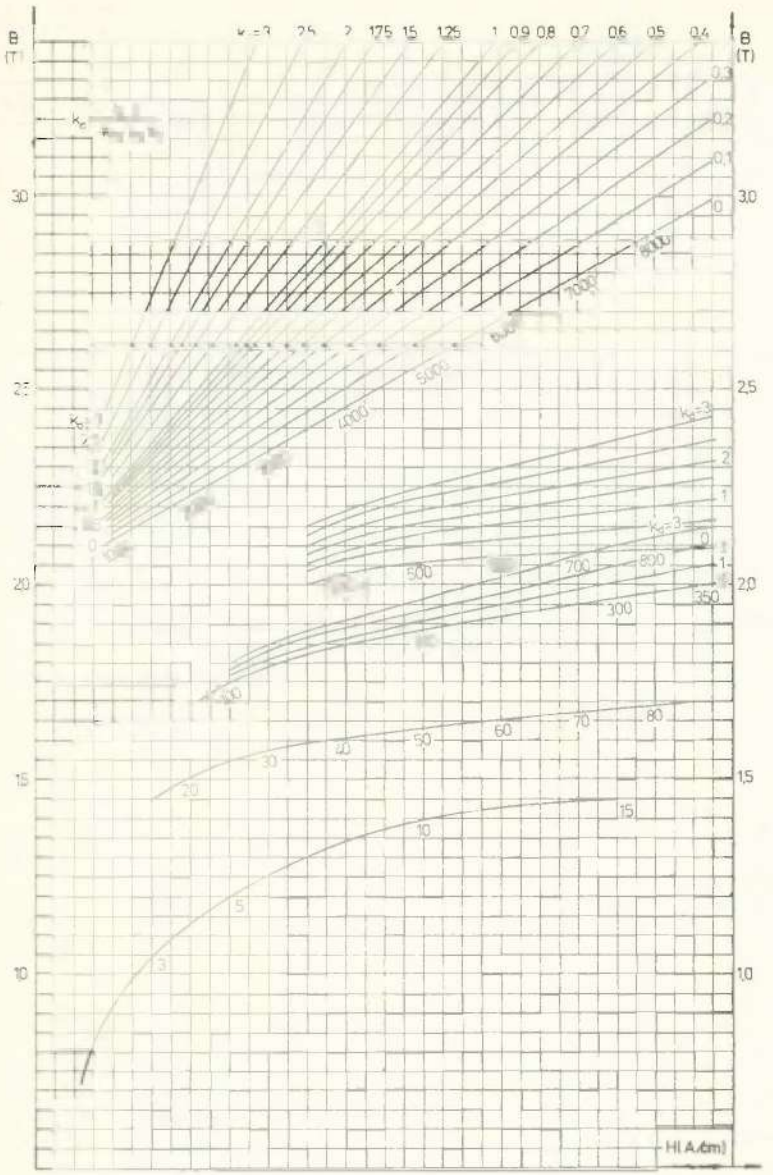
q	Pasul y_1	$\beta_y = y_1/y_\tau$	k_y	k_w	q	Pasul y_1	$\beta_y = y_1/y_\tau$	k_y	k_w
$3^3/_4$	1—11 1—10	0,89 0,8	0,985 0,951	0,94 0,907	$4^1/_2$	1—13 1—12 1—11	0,89 0,815 0,74	0,985 0,959 0,917	0,94 0,916 0,877
$3^4/_5$	1—11 1—10	0,88 0,79	0,98 0,945	0,937 0,903	$4^3/_4$	1—13 1—12	0,81 0,733	0,97 0,935	0,926 0,894
$3^6/_7$	1—11 1—10	0,865 0,778	0,978 0,94	0,934 0,902	$4^4/_5$	1—14 1—13	0,902 0,833	0,988 0,966	0,943 0,922
4	1—12 1—11 1—10 1—9	0,916 0,833 0,75 0,667	0,991 0,966 0,924 0,866	0,95 0,926 0,885 0,831	$4^7/_8$	1—14 1—13	0,89 0,82	0,985 0,959	0,94 0,916
$4^1/_8$	1—12 1—11	0,89 0,808	0,985 0,955	0,94 0,911	5	1—14 1—13 1—12	0,866 0,8 0,733	0,978 0,951 0,914	0,935 0,91 0,875
$4^1/_5$	1—12 1—11	0,872 0,792	0,98 0,948	0,935 0,905	$5^1/_2$	1—15 1—14	0,848 0,79	0,972 0,944	0,928 0,902
$4^1/_4$	1—12 1—11	0,854 0,785	0,98 0,944	0,933 0,901	6	1—16 1—15	0,833 0,778	0,966 0,94	0,925 0,9

TABELUL 1-II

Factorul de înfășurare al înfășurării trifazate, în două straturi, cu pas diametral

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
k_w	1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,957	0,956	0,955	0,955	0,955

Curba de magnetizare a tablei de oțel electrotehnic laminată la rece cu cristale neorientate (grosimea maximă 0,5 mm)



TABELUL 3-I

Tabela de magnetizare a tablei de oțel cu grosimea 1÷2 mm (pentru poli): H (A/cm)

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	1									
0,2	1,4									
0,3	1,8									
0,4	2,1									
0,5	2,5					2,75				
0,6	2,95					3,2				
0,7	3,45					3,75				
0,8	4,05					4,4				
0,9	4,8	4,9	4,95	5,05	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
1,0	5,7	5,8?	5,95	6,07	6,15	6,3	6,42	6,55	6,65	6,8
1,1	6,9	7,03	7,2	7,31	7,48	7,6	7,75	7,9	8,08	8,25
1,2	8,45	8,6	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,92	10,1	10,45
1,3	10,8	11,12	11,45	11,75	12,2	12,6	13,0	13,5	13,93	14,5
1,4	14,9	15,3	15,95	16,45	17,0	17,5	18,35	19,2	20,1	21,1
1,5	22,7	24,5	26,6	27,1	28,8	30,5	32,0	34,0	36,5	37,5
1,6	40,0	42,5	45,0	47,5	50,0	52,5	55,5	59,5	62,3	66,0
1,7	70,5	75,3	79,5	84,0	88,5	93,2	98,0	103,0	108,0	114,0
1,8	119,0	124,0	130,0	135,0	141,0	148,0	156,0	162,0	170,0	178,0
1,9	188,0	197,0	207,0	215,0	226,0	235,0	245,0	256,0	265,0	275,0
2,0	290,0	302,0	315,0	328,0	342,0	361,0	380,0			

TABELUL 3-II

Tabela de magnetizare pentru oțel turnat, forjat și table groase laminate: H (A/cm)

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72
0,1	0,8	0,88	0,96	1,04	1,12	1,2	1,28	1,36	1,44	1,52
0,2	1,6	1,68	1,76	1,84	1,92	2,0	2,08	2,16	2,24	2,32
0,3	2,4	2,48	2,5	2,64	2,72	2,8	2,88	2,96	3,04	3,12
0,4	3,2	3,28	3,36	3,44	3,52	3,6	3,68	3,76	3,84	3,92
0,5	4,0	4,04	4,17	4,26	4,34	4,43	4,52	4,61	4,7	4,79
0,6	4,88	4,97	5,06	5,16	5,25	5,35	5,44	5,54	5,64	5,74
0,7	5,84	5,93	6,03	6,13	6,23	6,32	6,42	6,52	6,62	6,72
0,8	6,82	6,93	7,03	7,24	7,34	7,45	7,55	7,66	7,76	7,87
0,9	7,98	8,10	8,23	8,35	8,48	8,5	8,73	8,85	8,98	9,11

TABELUL 3.II (continuare)

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,0	9,24	9,38	9,53	9,69	9,86	10,04	10,22	10,39	10,56	10,73
1,1	10,9	11,08	11,27	11,47	11,67	11,87	12,07	12,27	12,48	12,69
1,2	12,9	13,15	13,4	13,7	14,0	14,3	14,6	14,9	15,2	15,55
1,3	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,2	19,7	20,3
1,4	20,9	21,6	22,3	23,0	23,7	24,4	25,3	26,2	27,1	28,0
1,5	28,9	29,9	31,0	32,1	33,2	34,3	35,6	37,0	38,3	39,6
1,6	41,0	42,5	44,0	45,5	47,0	48,7	50,0	51,5	53,0	55,0

TABELUL 3-III

Tabela de magnetizare pentru fontă: H (A/cm)

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0	1	2	2,8	3,5	4,2	4,6	5	5,4	6,7
0,1	6	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1	8,4	8,7
0,2	9	9,3	9,6	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,4	11,8
0,3	12,2	12,6	13	13,4	13,8	14,3	14,7	15,1	15,6	16
0,4	16,4	16,9	17,5	18	18,6	19,1	19,7	20,2	20,8	21,4
0,5	22	22,6	23,5	24	24,7	25,3	26,2	27	27,8	28,6
0,6	29,4	30,3	31,3	32,2	33,2	34,2	35,2	36,2	37,2	38,2
0,7	39,2	40,5	41,8	43,2	44,6	46	47,5	49,1	50,7	52,3
0,8	54	55,7	57,5	59,3	61,1	63	65	67,1	69,3	71,4
0,9	73,6	75	77,8	80	83	86	89	92	95	98
1,0	101	105	108	112	116	120	124	128	132	136
1,1	140	144	149	154	159	165	170	175	181	180
1,2	192	198	204	211	215	225	232	240	247	255
1,3	262	270	278	286	294	303	342	321	330	339
1,4	348	359	370	382	392	409	423	436	450	464
1,5	478	494	570	520	545	562	580	600	—	—

TABELUL 4-I

Dimensiunile și secțiunile conductoarelor rotunde din cupru (Extras din STAS 685-75)

Diametrul nominal mm	Abateri limită la diam. nominal mm	Secțiunea nominală mm	Masa kg/km	Rezistența electrică la 20°C în curent continuu Ω/m		
				nom.	minim	maxim
1	2	3	4	5	6	7
0,020	±0,002	0,000311	0,0028	54,88	46,65	65,31
0,025		0,000491	0,0044	35,12	30,56	41,09
0,032		0,000804	0,0072	21,44	18,87	24,44
0,040		0,00126	0,0112	13,72	12,21	15,37
0,050		0,00196	0,0175	8,781	7,903	9,659
0,063		0,00312	0,0277	5,531	5,033	6,029
0,071	±0,003	0,00396	0,0352	4,355	3,985	4,725
0,080		0,00503	0,0447	3,430	3,156	3,704
0,090		0,00636	0,0566	2,710	2,507	2,913
0,100		0,00785	0,0699	2,195	2,042	2,349
0,112		0,00985	0,0877	1,750	1,646	1,864
0,125		0,01227	0,109	1,405	1,328	1,488
0,140		0,01539	0,137	1,120	1,064	1,180
0,160		0,02011	0,179	0,8575	0,8192	0,8982
0,180		0,02545	0,226	0,6775	0,6499	0,7068
0,200		0,03142	0,280	0,5488	0,5281	0,5706
0,224		0,03941	0,351	0,4375	0,4224	0,4534
0,250	±0,004	0,04909	0,437	0,3512	0,3373	0,3659
0,280		0,06156	0,548	0,2800	0,2698	0,2907
0,315		0,07793	0,694	0,2212	0,2139	0,2289
0,355		0,09898	0,881	0,1742	0,1689	0,1797
0,400	±0,005	0,1257	1,12	0,1372	0,1327	0,1419
0,450		0,1590	1,42	0,1084	0,1051	0,1118
0,500		0,1964	1,75	0,8781	0,08534	0,09037
0,560	±0,006	0,2463	2,19	0,07000	0,06794	0,07215
0,630		0,3117	2,77	0,05531	0,05381	0,05687
0,710	±0,007	0,3959	3,52	0,04355	0,04234	0,04481
0,750	±0,008	0,4418	3,93	0,03903	0,03788	0,04022
0,800		0,5027	4,47	0,03430	0,03334	0,03530
0,850	±0,009	0,5675	5,05	0,03038	0,02950	0,03131
0,900		0,6362	5,66	0,02710	0,02634	0,02789
0,950	±0,010	0,7088	6,31	0,02432	0,02362	0,02506
1,000		0,7854	6,99	0,02195	0,02134	0,02259

TABELUL 4-I (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
1,060	±0,011	0,8825	7,85	0,01953	—	—
1,120		0,9852	8,77	0,01750	—	—
1,180	±0,012	1,091	9,74	0,01576	—	—
1,250	±0,013	1,227	10,9	0,01405	—	—
1,320		1,368	12,2	0,01259	—	—
1,400	±0,011	1,539	13,7	0,01120	—	—
1,500	±0,015	1,767	15,7	0,009757	—	—
1,600	±0,016	2,011	17,9	0,008575	—	—
1,700	±0,017	2,270	20,2	0,007596	—	—
1,800	±0,018	2,545	22,6	0,006775	—	—
1,900	±0,019	2,835	25,2	0,006081	—	—
2,000	±0,020	3,142	28,0	0,005488	—	—
2,120	±0,021	3,530	31,4	0,004884	—	—
2,240	±0,022	3,911	35,1	0,004375	—	—
2,360	±0,024	4,374	38,9	0,003941	—	—
2,500	±0,025	4,909	43,7	0,003512	—	—
2,650	±0,027	5,515	49,1	0,003126	—	—
2,800	±0,028	6,158	54,8	0,002800	—	—
3,000	±0,030	7,069	62,9	0,002439	—	—
3,150	±0,031	7,793	69,4	0,002212	—	—
3,350	±0,034	8,814	78,4	0,001956	—	—
3,550	±0,036	9,898	88,1	0,001742	—	—
3,750	±0,038	11,04	98,3	0,001561	—	—
4,000	±0,040	12,57	112,0	0,001372	—	—
4,250	±0,043	14,19	126,3	0,001212	—	—
4,500	±0,045	15,90	142,0	0,001084	—	—
4,750	±0,048	17,72	157,2	0,0009730	—	—
5,000	±0,050	19,64	175,0	0,0008781	—	—

TABELUL 5-1

Dimensiunile și secțiunile conductorilor profilați (Extras din STAS 2873-76)

SÎRME

b \ a	0,8	0,9	1	1.06	1,12	1,18	1.25	1,32	1,4	1,5	1.6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2.24	2,36	2,5	2.65
2	1,46	1,63	1,79	1,90	2,03	2,14	2,39	2,42	2,59	—	3,00	—	3,25	—	3,64					
2,12	1,56	1,73	1,91	2,03	2,16	—	2,41	2,59	2,75	—	3,18	3,24	3,45	—	—	4,14				
2,24	1,66	1,84	2,03	2,16	2,29	2,43	2,59	2,74	2,92	3,11	3,37	3,65	3,67	—	4,12	—	4,64			
2,36	1,75	1,95	2,11	—	2,43	—	2,73	—	3,09	—	3,56	—	—	—	—	—	—			
2,5	1,86	2,08	2,29	2,44	2,59	2,74	2,91	3,09	3,29	3,54	3,79	3,89	1,14	4,39	4,64	1,94	—	5,35	5,70	
2.65	1,98	2.21	2,44	2,66	2,75	—	3,10	3,29	3,50	—	4,03	4,11	4,41	4,67	—	5,26	5,58	5,70	—	6,47
2,8	2,13	2,35	2,59	2,75	2,92	3,09	3,29	3,48	3,71	3,98	4,27	4,40	4,68	4,96	5,24	5,58	5,90	6,05	6,45	—
3	2,26	2,53	2,79	2,97	3,15	—	3,54	3,75	3,99	—	4,59	4,71	5,01	5,31	5,61	6,00	6,38	6,52	—	7,10
3,15	2,38	2,66	2,94	3,12	3,31	3,50	3,72	3,94	4,20	4,51	4,83	4,99	5,31	5,62	5,91	6,32	6,69	6,85	7,32	7,80
3,35	2,51	2,84	3,13	—	3,51	—	3,97	—	4,47	—	5,14	—	5,67	—	6,34	—	7,14	—	—	—
3,55	2,73	3,02	3,34	3,55	3,76	3,97	4,22	4,47	4,76	5,11	5,47	5,67	6,03	6,38	6,74	7,16	7,59	7,83	8,33	8,92
3,75	2,86	3,20	3,54	3,76	3,99	—	4,47	4,74	5,01	—	5,79	6,16	6,39	6,76	7,14	7,60	8,04	8,32	8,83	9,45
4	3,06	3,43	3,79	4,03	4,27	4,50	4,79	5,07	5,39	5,78	6,19	6,41	6,87	7,24	7,64	8,18	8,50	8,91	9,45	10,1
4,25	3,26	3,65	4,03	—	4,54	—	5,10	—	5,73	—	6,58	—	7,29	—	8,11	—	9,16	—	10,1	—
4,5	3,46	3,88	4,29	4,56	4,83	5,09	5,41	5,73	6,09	6,53	6,98	7,29	7,71	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	10,7
4,75	3,66	4,10	4,51	4,82	5,11	—	5,72	6,06	6,44	—	7,39	7,71	8,19	8,66	9,14	9,76	10,3	10,7	11,3	12,0
5	3,86	4,33	4,79	5,09	5,39	5,68	6,04	6,39	6,79	7,28	7,79	8,14	8,64	9,14	9,54	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7
5,3	4,10	4,60	5,08	—	5,72	—	6,41	—	7,20	—	8,26	—	9,18	—	10,2	—	11,5	—	12,7	—
5,6	4,34	4,87	5,39	5,72	6,06	6,39	6,79	7,18	7,63	8,18	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3
6	4,66	5,23	5,79	6,15	6,51	—	7,29	7,70	8,19	—	9,39	10,0	10,4	11,2	11,6	12,3	13,1	13,7	14,4	15,4
6.3	4,90	5,50	6,09	6,46	6,84	7,22	7,66	8,10	8,61	9,23	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2

b \ a	0.8	0.9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65

DREPTUNGHIULARE

2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a \ b
																				2
																				2,12
																				2,24
																				2,36
																				2,5
																				2,65
7,30																				2,8
7,85	—																			3
8,26	8,90	9,37																		3,15
—	—	10,0	—																	3,35
9,39	—	10,7	11,4	12,1																3,55
10,0	—	11,3	12,0	12,8	13,3															3,75
10,7	—	12,1	12,9	13,7	14,2	15,1														4
11,3	—	—	—	—	—	16,2	—													4,25
12,1	12,9	13,	14,5	15,4	16,0	16,7	18,3	19,3												1,5
12,8	—	14,4	15,3	16,3	17,0	—	19,3	—	21,7											4,75
13,5	14,5	15,2	16,2	17,2	17,9	19,1	20,4	21,6	—	24,1										5
14,3	—	16,1	—	18,3	—	—	—	—	—	25,6	—									5,3
15,1	16,2	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	22,9	24,2	25,7	27,6	28,8	30,5								5,6
16,3	—	18,3	19,6	20,8	21,6	23,1	24,6	26,0	27,5	—	30,9	—	35,1							6
17,1	81,3	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	29,0	30,6	32,5	34,4	36,9	38,8						6,3

2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a \ b

b \ a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65
6,7		5,86	6,48	—	7,29	—	8,16	—	9,16	—	10,5	—	11,7	—	13,0	—	14,7	—	16,2	—
7,1		6,22	5,89	7,31	7,74	8,16	8,66	9,16	9,73	10,1	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3
7,5			7,29	7,73	8,19	—	9,16	9,68	10,3	—	11,8	12,3	13,1	13,8	14,7	15,5	16,4	17,1	18,2	19,4
8			7,79	8,27	8,75	9,22	9,79	10,4	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7
8,5			8,29	8,80	9,31	—	10,4	11,0	11,7	—	13,4	14,0	15,0	15,7	16,6	17,6	18,7	19,5	20,7	22,0
9			8,79	9,33	9,87	10,4	11,0	11,7	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3
9,5				—	—	—	11,7	—	13,1	—	15,0	—	16,7	—	18,6	—	20,9	—	23,2	—
10					11,0	—	12,3	13,0	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,0	24,5	26,0
10,6						—	—	13,8	14,6	—	16,8	17,6	18,7	19,7	20,8	22,1	23,4	24,4	26,0	27,6
11,2						—	13,8	14,6	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1
11,8								—	—	—	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29,0	—
12,5									17,3	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,5
13,2										—	20,9	22,0	23,4	24,7	26,0	27,6	29,2	30,7	32,4	34,6
14											22,2	23,4	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6
15											—	26,6	28,1	29,6	31,4	33,2	34,8	37,0	39,2	
16												28,4	—	31,6	33,6	35,5	27,3	39,5	41,8	
17													31,9	—	35,6	37,7	39,5	—	44,5	
18														35,6	37,7	40,0	41,9	44,5	47,2	
19															—	42,2	44,2	—	49,7	
20																44,4	—	49,5	52,5	
22																		—	—	
25																				
26,5																				
28																				
30																				
32																				
36																				
b / a	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65

2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a / b
18,2	—	20,6	—	23,2	—	25,9	—	29,3	—	—	—	—	—	—						6,7
19,3	20,7	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	36,8	38,9	41,7	43,8	49,3					7,1
20,5	—	23,1	24,6	26,1	27,3	29,1	31,0	32,9	34,8	36,6	38,9	41,1	44,1	46,3	52,4					7,5
21,9	23,4	24,6	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,1	41,5	43,9	47,1	49,5	55,9	63,1				8
23,3	—	26,2	28,0	29,6	31,0	33,1	35,2	37,4	39,5	—	44,2	46,7	50,1	52,7	59,3	67,1				8,5
24,7	26,4	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5	53,1	55,8	63,0	71,1	80,1			9
26,0	—	29,4	—	33,2	—	37,1	—	41,9	—	46,6	—	52,3	—	—	—	—	—			9,5
27,5	29,5	30,9	33,3	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1	59,1	62,1	70,1	79,1	89,1	99,1		10
29,1	—	32,8	35,0	37,1	38,9	41,5	44,2	46,8	49,5	52,1	55,3	58,5	62,7	65,9	74,3	83,9	94,6	—		10,6
30,8	33,0	34,7	37,0	39,2	41,1	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9	66,3	69,7	78,7	88,7	100	111	125	11,2
32,5	—	36,6	—	41,3	—	46,3	—	52,2	—	58,1	—	65,2	—	—	—	—	—	—	—	11,8
34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1	74,1	77,8	87,9	99,1	112	124	139	12,5
36,4	—	41,0	43,7	46,3	48,7	51,9	55,2	58,5	61,8	65,1	69,1	73,1	78,3	82,3	92,8	105	118	—		13,2
38,7	41,4	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5	83,1	87,3	98,5	111	125	139		14
41,5	—	46,7	49,7	52,7	55,3	59,1	62,9	66,6	70,3	74,1	78,6	83,1	89,1	93,7	106	119	134	149		15
44,3	47,5	49,9	53,0	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7	95,1	100	113	127				16
47,1	—	53,0	56,4	59,9	62,9	—	71,4	75,6	79,8	—	89,2	94,3	101	106	120	135				17
49,9	—	56,2	59,8	63,4	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,6	100	107	112	127	143				18
52,7	—	59,3	63,1	66,9	70,4	—	79,8	84,6	89,3	—	100	106	113	119	134	151				19
—	59,5	62,5	—	70,5	—	79,1	—	89,1	—	99,1	—	111	119	125	141	159				20
61,1	—	68,8	73,1	77,5	81,6	—	92,6	98,1	104	109	116	122	131	138	155					22
69,5	74,5	78,2	83,2	88,2	92,9	99,1	105	112	118	124	132	139	149	157						25
	—	83,0	88,2	93,5	98,5	—	111	118	125	—	140	147	158							26,5
		87,7	93,2	98,9	104	111	118	125	132	139	148	156	167							28
			—	106	112	119	127	134	142	149	158	167								30
					119	127	135	143	151											32
						143	152	161	170											36
2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	a / b

b \ a	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,25	1,32	1,4
8	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,40	7,20						
8,5	–	–	–	–	–	–	4,25	5,10	5,25	5,80	7,65						
9	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,60	4,50	5,40	6,30	7,20	8,10						
9,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–						
10	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	9,78	10,4	10,9			
10,6	–	–	–	–	–	–	5,30	6,36	7,42	8,48	9,54	10,4	11,0	11,6			
11,2	1,12	1,68	2,24	2,80	3,36	4,48	5,60	6,72	7,84	8,96	10,1	11,0	11,6	12,3	13,7	14,4	
11,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
12,5	1,25	1,88	2,50	3,13	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	9,0	11,3	12,5	13,2	13,7	15,3	16,1	17,1
13,2	–	–	–	–	–	–	6,60	7,92	9,24	10,6	11,9	13,2	13,8	14,6	16,2	17,1	18,0
14	1,40	2,10	2,80	3,50	4,20	5,60	7,00	8,40	9,80	11,2	12,6	13,8	–	15,4	17,2	–	19,2
15	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	11,8	15,7	16,5	18,4	19,4	20,6
16	1,60	2,40	3,20	4,00	4,80	6,40	8,00	9,60	11,2	12,8	14,4	15,8	–	17,6	19,7	–	22,0
17	–	–	–	–	–	–	8,50	10,2	11,9	13,6	15,3	16,8	17,8	18,5	20,9	22,1	23,4
18	1,80	2,70	3,50	4,50	5,40	7,20	9,00	10,8	12,6	14,4	16,2	17,8	18,8	19,9	22,2	23,4	24,8
19	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18,8	19,9	21,0	23,4	24,7	26,2
20	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	8,00	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	19,8	–	22,1	24,7	–	27,7
22	2,20	3,30	4,40	5,30	6,60	8,80	11,0	13,2	15,4	17,6	19,8	21,8	23,1	24,4	27,2	28,7	32,4
25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	21,8	26,3	27,7	30,9	32,6	34,6
26,5	–	–	–	–	–	–	13,2	15,9	18,5	21,2	23,8	26,3	27,9	29,1	32,8	34,6	36,7
28	2,80	4,20	5,60	7,00	8,40	11,2	14,0	16,8	19,6	22,4	25,2	27,8	29,5	31,1	31,7	36,6	38,8
30	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	29,8	31,6	33,3	37,2	39,2	41,6
32	3,20	4,80	6,40	8,00	9,60	12,8	16,0	19,2	22,4	25,6	28,8	31,8	33,7	35,5	39,7	41,8	44,3
36	3,60	5,40	–	–	10,8	–	18,0	–	25,2	28,8	32,4	35,8	37,9	40,0	44,7	47,1	50,0
40	4,00	6,00	8,00	10,0	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	39,8	42,1	44,5	49,7	52,4	55,6
45	–	6,75	–	–	13,5	–	22,5	–	34,5	36,0	–	44,8	–	–	55,9	58,0	62,6
50	5,00	7,50	10,0	12,5	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	46,0	49,8	52,8	55,7	62,2	66,6	69,6
56	–	–	–	–	16,8	–	28,0	–	39,2	44,8	–	56,8	–	–	–	–	–
63	6,30	9,43	12,6	15,8	18,9	25,2	31,5	37,8	44,1	50,4	56,7	62,8	64,5	70,8	78,4	82,8	87,8
71	–	–	14,2	–	21,3	28,4	35,5	42,6	–	56,8	63,9	70,8	–	–	–	–	–
80	8,00	12,0	16,0	20,0	24,0	32,6	49,0	48,0	56,0	64,0	72,0	79,8	–	89,3	99,7	–	112
90	–	–	–	–	–	–	45,0	–	–	72,0	–	–	–	–	–	–	–
100	10,0	15,0	20,0	26,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	81,0	94,8	–	112	125	–	140
a \ b	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,06	1,12	1,25	1,32	1,4

1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	a \ b
																8
																8,5
																9
																9,5
																10
																10,6
																11,2
																11,8
																12,5
																13,2
–	21,8															14
–	23,4	24,9	–													15
23,5	25,0	–	28,1													16
–	26,6	28,6	29,9													17
–	28,2	30,0	31,9	33,4	35,1											18
–	29,8	31,7	33,5	35,3	–	39,3										19
29,5	31,4	–	35,3	–	39,1	–	44,7	–	48,7							20
–	34,6	33,4	38,9	41,0	43,1	45,7	48,3	50,7	53,7							22
37,0	39,4	41,9	44,3	46,7	49,1	52,0	55,0	57,8	61,2	64,7	–					25
–	41,8	44,5	47,0	49,5	–	55,2	58,3	61,4	–	68,7	72,5					26,5
–	44,2	47,0	49,7	52,4	55,1	58,4	61,7	64,4	68,7	72,7	76,7	82,1				28
44,5	47,4	50,4	53,3	56,2	59,1	62,6	66,1	69,6	73,7	78,0	82,3	88,1	92,4	–	–	30
–	50,6	53,6	56,9	60,0	63,1	66,8	70,6	74,3	78,7	83,3	87,9	94,1	98,7	–	111	32
–	57,0	60,6	61,1	67,6	71,1	75,3	79,6	81,4	88,7	93,9	99,1	–	111	–	125	36
59,5	63,4	67,4	71,3	75,2	79,1	83,8	88,6	93,2	98,7	104	110	118	124	–	139	40
–	71,4	75,9	80,3	84,7	–	91,5	99,8	105	–	118	124	133	140	–	157	45
74,5	79,4	84,4	89,3	94,2	99,1	105	111	117	124	131	138	148	155	–	175	50
–	89,0	94,6	100	106	–	118	124	131	–	147	155	166	174	–	196	56
–	100	–	113	119	125	133	140	148	156	153	172	187	196	–	221	63
–	113	–	–	134	–	–	–	164	–	–	–	214	221	–	249	71
–	127	–	143	151	169	–	178	188	199	–	207	235	250	–	281	80
–	143	–	–	170	–	–	–	211	–	–	–	266	–	–	–	90
	160	–	179	184	199	–	223	235	248	–	278	298	313	–	352	100
1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	b \ a

TABELUL 5-III

Extras din STAS 2873-78

BARE DREPTUNGHIULARE

b \ a	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	12,5	14	16	18	20	22	25	28	32	b \ a
16										178	199	223	255							16
18										200	—	251	—	323						18
20									199	223	249	279	319	359	399					20
22								197	—	245	—	307	—	395	—	461				22
25						177	199	224	249	279	311	349	399	449	499	—	624			25
28				167	175	198	—	251	—	313	—	391	—	503	—	615	—	783		28
32	—	169	178	191	201	226	—	287	—	357	—	447	—	575	—	703	—	894	1 022	32
36	179	—	201	215	226	—	287	—	359	—	449	—	—	—	719	—	899	—	1 295	36
40	199	—	223	239	251	283	319	359	399	447	499	559	639	719	799	—	999	1 119		40
45	224	—	251	269	283	319	359	404	494	498	562	629	719	809	899	—	—	1 259		45
50	249	—	279	299	314	354	399	449	499	559	624	699	799	899	999	—				50
56	279	—	313	355	352	397	449	503	599	—	699	—	895	—	1 007	—				56
63	314	—	359	377	396	446	503	566	629	—	787	—	1 007	—	1 259	—				63
71				—	—	—	567	638	709	—	886	—	1 135							71
80				479	—	567	639	—	799	—	999									80
90				539	—	638	719	—	899	—	1 124									90
100				599	—	709	799	—	999	—	1 219									100
b \ a	5	5,3	5,6	6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	12,5	14	16	18	20	22	25	28	32	b \ a

Grosimea bilaterală a izolației d_{iz} — d respectiv creșterea laturii

Izolația		Conductor rotund				
Compunerea	Simbol	0,03... 0,09	0,1... 0,18	0,19... 0,29	0,3... 0,48	0,5... 0,75
Bumbac: 1 × înfășurare	B	—	0,1	0,1	0,12	0,12
Bumbac: 2 × înfășurare	BB	—	0,16	0,16	0,20	0,22
Bumbac: 3 × înfășurare	3B	—	—	—	—	—
Bumbac: 1 × țesătură	T	—	—	—	—	—
Bumbac: 1 × înfășurare + 1 × țesătură	BT	—	—	—	—	—
Bumbac: 2 × înfășurare + 1 × țesătură	BBT	—	—	—	—	—
Mătase: 1 × înfășurare	M	0,036	0,035	0,040	0,040	0,040
Mătase: 2 × înfășurare	MM	0,070	0,070	0,070	0,070	0,080
Email tereftalic	E	0,01... 0,015	0,015... 0,02	0,015... 0,04	0,03... 0,045	0,03... 0,06
Email tereft. 1 × înfășurare + mătase	EM	0,07	0,075	0,09... 0,10	0,105... 0,110	0,115
Sticlă: 1 × înfășurare	S	—	—	—	—	—
Sticlă: 2 × înfășurare	2S	—	—	—	—	—
Sticlă: 3 × înfășurare	3S	—	—	—	—	—
Sticlă: 1 × țesătură	T	—	—	—	—	—
Sticlă: 1 × înfășurare + 1 × țesătură	ST	—	—	—	—	—
Sticlă: 2 × înfășurare + 1 × țesătură	2ST	—	—	—	—	—
Sticlă: 2 × țesătură	2T	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 1 × înfășurare	ES	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 2 × înfășurare	E2S	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 3 × înfășurare	E3S	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 1 × țesătură	ET	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 1 × înfășurare + 1 × țesătură	EST	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 2 × înfășurare + 1 × țesătură	E2ST	—	—	—	—	—
Email tereftalic + sticlă: 2 × țesătură	E2T	—	—	—	—	—
Hîrtie H	H	Creșterea dimensiunilor conductorului				

(creșterea diametrului conductorului mici a conductorului $a_{iz} - a$)

Conductor rotund — diametrul d, în mm				Conductor profilat-latura mică a, în mm			
0,8... 1,45	1,9... 2,9	3,... 3,8	4... 6	0,83... 1,45	1,5... 2,83	3... 3,8	4... 6
0,12	0,15	—	—	0,12	0,15	—	—
0,22	0,26	0,30	0,40	0,22	0,26	0,30	0,40
0,36	0,40	0,50	0,50	0,36	0,40	0,50	0,60
0,45	0,45	0,50	0,60	0,45	0,45	0,50	0,50
0,55	0,60	0,60	0,60	0,55	0,60	0,60	0,60
0,70	0,70	0,80	0,90	0,70	0,70	0,80	0,90
0,040	—	—	—	0,040	—	—	—
0,080	—	—	—	0,080	—	—	—
0,04... 0,08	0,05... 0,08	—	—	0,05... 0,09	0,06 0,1	0,1	0,12
0,125... 0,135	—	—	—	—	—	—	—
0,20	0,25	—	—	—	—	—	—
0,30	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,40	0,45
—	—	0,45	0,45	—	—	—	—
—	—	—	—	0,40	0,40	0,45	0,50
—	—	—	—	0,55	0,60	0,65	0,65
		—	—	—	0,70	0,75	0,75
—	—						
—	—	—	—	—	0,70	0,75	0,75
0,25	0,30	—	—	—	—	—	—
0,35	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50
—	—	0,50	0,50	—	—	—	—
—	—	—	—	0,45	0,45	0,50	0,55
—	—	—	—	0,60	0,65	0,70	0,70
		—	—	—	0,75	0,80	0,80
—	—						
—	—	—	—	—	0,75	0,80	0,80

este egală cu grosimea bilaterală a izolației plus o abatere a acesteia de $i(10...15)\%$

Scheme de izolații folosite la mașinile electrice rotative normale

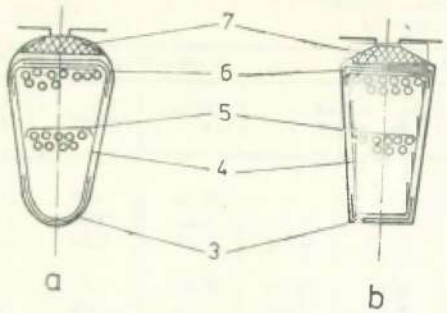


Fig. 7-I. Crestătură ovală sau trapezoidală cu conductor rotund.

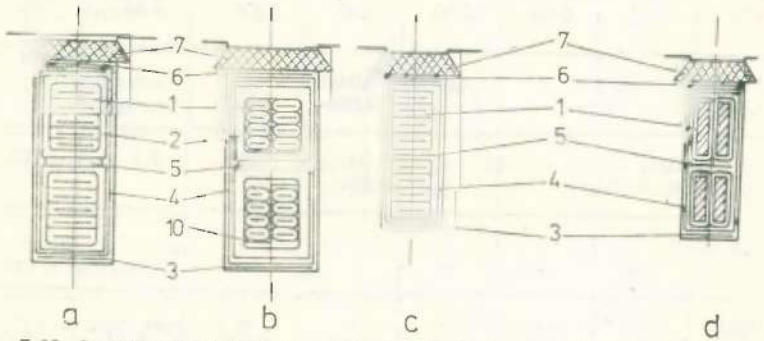


Fig. 7-II. Crestătură deschisă cu conductor profilat (a, b și c) sau bară continuă — fără mufă de inserire (d).

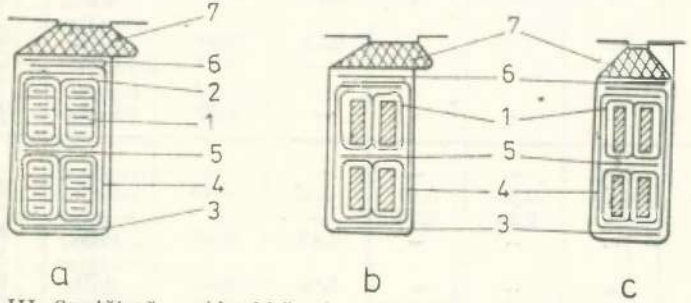


Fig. 7-III. Crestătură semideschisă ori semiînchisă cu conductor profilat (*a*), cu bară continuă (*b*) sau cu semibare — cu mufe de inserire (*c*).

Observații : 1°. Materialele fiecărei poziții în mai multe variante posibile, în funcție de clasa de izolație folosită, sînt indicate în tabelul 7-I.
2°. Poziția 10 — izolație între rînduri — se pune în „Z" pe toată lungimea bobinei, din folie flexibilă cu grosimea de 0,2—0,3 mm.

TABELUL 7-I

Materiale electroizolante recomandate pentru înfășurările mașinilor electrice rotative

Clasa de izolație	Izolație discontinuă		Izolație continuă			
	B	F	B	F	H	
Izolația conductorului (poz. 1)	a) Email b) Micabandă pe hîrtie sau pînză c) Fire de sticlă + email cls. B(E2S) d) Samicabandă	a) Email b) Micabandă pe pînză c) Fire de sticlă + email cls. F (E2S) d) Samicabandă	a) Micabandă pe suport de mătase sau hîrtie b) Samicabandă poroasă pe suport de sticlă c) Samicabandă preimpregnată pe suport de sticlă	a) Micabandă pe suport de țesătură de sticlă b) Samicabandă poroasă pe suport de sticlă c) Samicabandă preimpregnată pe suport de sticlă		La schemele de izolație clasă H se folosesc materiale similare cu cele de la clasa F cu deosebirea că suportul benzilor și foliilor este din țesătură de sticlă, iar liantul sau lacul de impregnare este lacul siliconic. Benzile izolante constau din țesătură de sticlă impregnate în lac siliconic sau din cauciuc siliconic cu sau fără inserție de fire de sticlă
Izolația secției sau bobinei pe partea activă (poz. 2)	a) Teacă de micafoliu cu șelac pe suport de hîrtie b) Teacă de samicafoliu preimpregnat cu rășină sintetică cls. B	a) Teacă de micafoliu pe pînză de sticlă b) Teacă din samicafoliu de sticlă preimpregnat cu rășină sintetică cls.F				
Izolația capetelor frontale ale secțiilor sau bobinelor	Tensiuni sub 1 kV (JT) a) Bandă de bumbac impregnată b) Bandă de sticlă impregnată sau neimpregnată	Tensiuni sub 1 kV (JT) a) Bandă de sticlă impregnată sau neimpregnată	a) Bandă de sticlă lăcuită b) Bandă de sticlă impregnată c) Bandă Epoflex (pe bază de pisla din fibre poliesterice)			

TABELUL 7-I (continuare)

Clasă de izolaţie	Izolaţie discontinuă		Izolaţie continuă		
	B	F	B	F	H
Izolaţia crestăturii (poz. 4)	Tensiuni sub 1 kV (JT) a) Preşpan b) Lateroid c) Folie combinată de clasă B	a) Folie combinată de clasă F	a) Preşpan b) Leteroid c) Folie combinată pentru cls. B	a) Folie combinată pentru clasa F	
	Tensiuni peste 1 kV (IT) Se prevede preşpan, leteroid sau altă folie cu scop de protecţie mecanică: poate lipsi în cazuri justificate tehnologic				
Izolaţia între straturi şi la fundul crestăturii poz. 3 şi 5.	a) Preşpan b) Leteroid c) Micanită flexibilă (de formare) b) Folie combinată între faze în cazul maşinilor trifazate cu bobine moi din conductor emailat Obs. Această izolaţie se aşază peste poz. 1	a) Micanită flexibilă b) Sticlotextolit c) Folie combinată între faze în cazul maşinilor trifazate cu bobine moi din conductor emailat Obs. Această izolaţie se aşază peste poziţia 1	a) Preşpan b) Leteroid c) Micanită flexibilă	a) Micanită flexibilă b) Sticlotextolit	

TABELUL 7-I (continuare)

Clasă de izolaţie	Izolaţie discontinuă		Izolaţie continuă		
	B	F	B	F	H
Izolaţia sub pană (poz. 6)	a) Sticlotextolit	a) Sticlotextolit	a) Sticlotextolit	a) Sticlotextolit	
Pana (poz. 7)	a) Lemn fiert în ulei b) Pertinax (Izoplac) c) Sticlotextolit d) Lemn densificat	a) Sticlotextolit b) Pană trasă din fire de sticlă încleiată cu epoxi	a) Lemn fiert în ulei b) Pertinax (Izoplac) c) Sticlotextolit	a) Sticlotextolit b) Pană trasă din fire de sticlă încleiată în epoxi	

TABELUL 7-II

Grosimea tecilor izolante

Tensiunea nominală	Samicabandă preimpr.	Samicafoliu impregnat	Micafoliu impregnat
pînă la 1 kV	0,8—1,2 mm	1,00—1,2 mm	0,5 —0,75 mm
pînă la 3 kV	1,2—1,5 mm	1,4 —1,8 mm	1 —1,5 mm
pînă la 6 kV	1,6—2 mm	2 —2,5 mm	1,75—2 mm
pînă la 10 kV	2,2—3 mm	3 —3,5 mm	3 —3,5 mm

Izolaţia părţii frontale a bobinelor la tensiuni peste 1 kV (IT)

a) Micabandă sau samicabandă preimpregnantă cu o grosime totală mai mică decît teaca plus 1—2 straturi de pînză lăcuită sau bandă de sticlă impregnată.

b) Micabandă sau samicabandă preimpregnantă cu o grosime totală mai mică decît a tecii plus 1—2 straturi bandă Epoflex sau bandă de sticlă impregnantă de 0,10—0,15.

Obs. 1. Poz. 1, 2, 3.. corespund cu poziţiile indicate în figurile 7-I, 7-II şi 7-III.

2. Indicii a, b, c reprezintă variante posibile.

3. Izolarea conductoarelor cu micabandă sau samicabandă se face 1×1/2 suprapus.

4. Grosimea tecii izolante se alege în funcţie de tensiunea nominală conform tabelului 7-II.

TABELUL 8-I

Bare rotunde trase din CUPRU (Extras din STAS 391-72)

Diametrul d mm	Abateri limită		Secțiunea mm²	Masa teoretică kg/m
	normale	speciale h (11)		
3,0	−0,10	−0,06	7,07	0,063
3,5			9,62	0,086
4,0			12,57	0,112
4,5	−0,12	−0,075	15,90	0,141
5,0			19,64	0,175
6,0			28,27	0,252
7			38,48	0,342
8			50,27	0,447
9	−0,150	−0,09	63,62	0,566
10			78,54	0,699
11			95,0	0,846
12		−0,11	113,1	1,010
14	−0,180		153,9	1,370
16			201,1	1,790
18			254,5	2,265
20			314,2	2,796
22		−0,13	380,1	3,383
25	−0,210		490,9	4,370
28			615,8	5,480
30			706,9	6,291
32			804,2	7,158
35			962,1	8,563
36			1 018,0	9,060
38	−0,250	−0,16	1 134,1	10,094
40			1 257,0	11,184
45			1 590,0	14,160
50			1 964,0	17,500

TABELUL 8-II

Bare rotunde trase din ALAMĂ (Extras din STAS 291-77)

Diametrul mm			Aria secțiunii mm²	Masa teoretică kg/m
Nominal	Abateri limită			
	normale (j_g 12)	speciale (h11)		
3,0	±0,05	0 −0,06	7,069	0,0601
3,5			9,621	0,0820
4,0			12,57	0,107
4,5	±0,06	0	15,90	0,135
5,0		−0,075	19,64	0,167
5,5			23,76	0,202
6,0			28,27	0,240
6,5			33,18	0,282
7,0			38,48	0,327
7,5			44,18	0,376
8,0	±0,075	0	50,27	0,427
8,5		−0,09	56,75	0,482
9,0			63,62	0,541
9,5			70,88	0,602
10,0			78,54	0,668
10,5			86,59	0,736
11,0			95,03	0,808
12,0			113,10	0,901
13,0	±0,09	0	132,73	1,13
14,0		−0,11	153,94	1,31
15,0			176,71	1,50
16,0			201,10	1,71
18,0			254,50	2,16
19			283,5	2,41
20			314,2	2,67
21			346,4	2,94
22			380,1	3,23
23			415,3	3,53
24	±0,105	0	452,4	3,85
25		−0,13	490,9	4,17
26			530,9	4,51
27			572,6	4,87
28			615,8	5,23
29			660,5	5,61
30			706,9	6,01
32			804,2	6,84
34			907,9	7,72
36			1 018,0	8,65
38		0	1 134,1	9,64
40	±0,125	−0,16	1 256,6	10,68
42			1 385,0	11,80
45			1 590,4	13,50
48			1 810,0	15,40
50			1 963,5	16,69

BIBLIOGRAFIE

1. ALEXEEV, A. E.: *Construcția mașinilor electrice*. Traducere din limba rusă. Editura energetică de stat, București, 1954.
2. BĂLĂ, C.: *Proiectarea mașinilor electrice*. Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
3. CIOC, I.: „Considerații teoretice și constructive asupra unei variante de rotor pentru mașinile sincrone". În: Electrotehnica, 25, Nr. 5, 1977, p. 189–193.
4. DANILEVICI, Ia. B.; DOMBROVSKI, V. V.; KAZOVSKI, E. IA.: *Parametrii mașinilor de curent alternativ*. Traducere din limba rusă. Editura tehnică, București, 1968.
5. GHEORGHIU, I. S.; FRANSUA, AL.: *Tratat de mașini electrice*, vol. IV. Editura Academiei R. S. România, București, 1972.
6. KLAMT, J.: *Berechnung und Bemessung elektrischer Maschinen*. Springer-Verlag, Berlin, 1962.
7. KOSTENKO, M.; PIOTROVSKI, L.: *Machines électriques, tome II. Machines a courant alternatif*. Editions Mir, Moscou, 1969.
8. LIWSCHITZ, M.: *Calcul des machines électriques, tomes I et II*. Traduction et adaptation de Louis Maret. Spes Lausanne, Paris, 1967 et 1970.
9. NICOLAIDE, A.: *Mașini electrice. Teorie. Proiectare, vol. II*. Editura Scrisul românesc, Craiova, 1975.
10. NICOLAIDE, A.: „Studiul parametrilor electrici și al caracteristicilor de funcționare în asincron a mașinii sincrone, cu ajutorul calculatorului electronic numeric". În: Electrotehnica, 20, Nr. 12, 1972, pag. 443–450.
11. POSTNIKOV, I. M.: *Proiectarea mașinilor electrice*. Traducere din limba rusă. Editura energetică de stat, București, 1954.
12. RICHTER, R.: *Mașini electrice, vol. I, II*. Traducere din limba germană. Editura tehnică, București, 1969.
13. SERGHEEV, P. S.; VINOGRADOV, N. V.; GORJAINOV, F. A.: *Proektirovanie Electriceskih Mașin*. Editura Energiia, Moskva, 1969.
14. WIEDEMANN, E.; KELLENBERGER, W.: *Konstruktion elektrischer Maschinen*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1967.
15. * * * *Memoratorul inginerului electrician* — Siemens. Traducere din limba germană cu adaptări la condițiile din România. Editura tehnică, București, 1971.
16. * * * STAS 1893-78. *Mașini electrice rotative. Condiții tehnice generale de calitate.*

Lei 23